

Санкт-Петербургский государственный университет

**СОЛОВЬЕВА Анна Денисовна**

**Выпускная квалификационная работа**

***Природные стекла как объекты геммологии (Геммология и генезис природных стекол)***

Уровень образования: Бакалавриат

Направление *05.03.01 «Геология»*

Основная образовательная программа *СВ.5018.2016*

Научный руководитель:

к. г.-м. н., доцент кафедры Минералогии, СПбГУ

Золотарев А. А.

Рецензент:

к. г.-м. н., доцент кафедры Геологии и Геоэкологии, РГПУ им. А. И. Герцена

Синай М. Ю.

Санкт-Петербург

2020

## АННОТАЦИЯ

Данная выпускная квалификационная работа посвящена генетическим и диагностическим аспектам геммологии природных (импактных и вулканических), техногенных и синтетических стекол. Актуальность генетической стороны данного исследования заключается в том, что взгляды исследователей на условия образования стекол расходятся, и выявление новых данных и проверка уже имеющихся разрешат некоторые споры и разногласия по этому вопросу. Изучение природных стекол также важно в связи с прогнозными исследованиями на месторождения вулканогенных полезных ископаемых. Важность диагностических аспектов исследования основана на том, что обсидианы и другие природные, синтетические и техногенные стекла широко используются как материал для ювелирных изделий и предметов декоративно-прикладного искусства. В настоящей работе, таким образом, рассматриваются два вопроса геммологии: определение генезиса стекол и геммологическая диагностика по их петрохимическим, физическим, оптическим и спектроскопическим свойствам, а также по содержащимся в них микровключениям.

*Ключевые слова:* влтавит, вулканическое стекло, жаманшинит, импактит, индошинит, иргизит, ливийское стекло, макузанит, микровключения, обсидиан, синтетическое стекло, тектит, тенгизит.

## ABSTRACT

This Qualification Work is devoted to the genetic and diagnostic aspects of the gemology of natural (impact and volcanic), technogenic and synthetic glasses. The relevance of the genetic side of this study concludes in the fact that the views of researchers varies on the conditions for the formation of glasses. The identification of new and verification of existing data will resolve some disputes and disagreements on this issue. The study of natural glasses is also important in connection with predictive studies of volcanic mineral deposits. The importance of the diagnostic aspects of the study is based on the fact that obsidian and other natural, synthetic and technogenic glasses are widely used as a material for jewelry and objects of decorative and applied art. Thus, in this work, two questions of gemology are considered: determining the genesis of glasses and gemological diagnostics by their petrochemical, physical, optical, and spectroscopic properties, as well as by the microinclusions contained in them.

*Key words:* vltavite, volcanic glass, zhamanshinite, impactite, indoshinite, irgizite, Libyan glass, makusanite, microinclusions, obsidian, synthetic glass, tektite, tenghizite.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТЕКЛООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ ВЕЩЕСТВА</b> .....	<b>9</b>
<b>ГЛАВА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СТЕКОЛ</b> .....	<b>15</b>
2.1. ИЗВЕРЖЕННЫЕ СТЕКЛА .....	16
2.1.1. ВУЛКАНИЧЕСКИЕ СТЕКЛА .....	16
2.1.1.1. НАЗЕМНЫЕ СТЕКЛА.....	16
<i>ОБСИДИАН</i> .....	17
<i>МАКУЗАНИТ</i> .....	22
2.1.1.2. ПОДВОДНЫЕ СТЕКЛА.....	25
2.1.2. ИНТРУЗИВНЫЕ СТЕКЛА .....	26
2.2. КРИПТОВЗРЫВНЫЕ СТЕКЛА .....	27
2.2.1. ФУЛЬГУРИТЫ .....	27
2.2.2. ИМПАКТНЫЕ СТЕКЛА .....	28
2.2.3. ТЕКТИТЫ .....	35
<i>КРАТЕР ЖАМАНШИН</i> .....	40
<i>КРАТЕР РИС</i> .....	43
<i>ЛИВИЙСКОЕ СТЕКЛО</i> .....	44
2.3. ТЕХНОГЕННЫЕ СТЕКЛА .....	47
<i>ТЕНГИЗИТ</i> .....	47
<b>ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	<b>49</b>
3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ .....	49
3.2. ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ.....	58
3.3. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В СТЕКЛАХ .....	63
3.4. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ.....	74
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>78</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>81</b>

<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТЕКОЛ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА</b> .....	<b>88</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ В СТЕКЛАХ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА.....</b>	<b>96</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СПЕКТРЫ МИНЕРАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ИССЛЕДУЕМЫХ ПРИРОДНЫХ СТЕКЛАХ.....</b>	<b>98</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Данная выпускная квалификационная работа посвящена генетическим аспектам фундаментальной и диагностическим аспектам прикладной стороны геммологии. Генетические аспекты работы затрагивают условия образования природных стекол, так как среди них выделяют разнообразные типы: вулканический, интрузивный, импактный, контактово-метаморфический, а также выделяют тектиты и фульгуриты (стекла, образованные от удара молнии), некоторые из них имеют спорный генезис (Природные стекла..., 1987). Кроме природных и синтетических стекол существуют стекла техногенного генезиса, тенгизиты, образовавшиеся при горении одноименной нефтяной скважины в Казахстане. Актуальность данного исследования заключается в том, что взгляды исследователей на условия образования стекол расходятся, например, на происхождение ливийского стекла существуют две точки зрения: одни авторы считают его вулканическим (Brugge, 2006), другие доказывают его импактный генезис (Koeberl, 1997). Выявление новых данных и проверка уже имеющихся разрешат некоторые споры и разногласия по этому вопросу. Изучение природных стекол также важно в связи с прогнозными исследованиями на месторождения вулканогенных полезных ископаемых. Важность диагностических аспектов исследования основана на том, что обсидианы и другие природные, синтетические и техногенные стекла широко используются как материал для ювелирных изделий и предметов декоративно-прикладного искусства. В настоящей работе, таким образом, рассматриваются два вопроса геммологии: определение генезиса стекол и геммологическая диагностика по их петрохимическим, физическим и оптическим свойствам, а также по содержащимся в них микровключениям.

Цель: определение физико-химических условий образования стекол, а также установление сходств и различий физических, оптических, петрохимических и спектроскопических свойств стекол и включений в них для геммологической диагностики.

Задачи:

- изучение и сравнение физических характеристик природных стекол различного генезиса;
- изучение и сравнение оптических характеристик стекол различного генезиса;
- изучение и сравнение петрохимических и геохимических характеристик стекол различного генезиса;

- изучение и сравнение спектроскопических характеристик стекол различного генезиса;
- изучение и сравнение минеральных включений в стеклах различного генезиса.

Объекты исследования:

24 плоско-полированных шлифа (толщина шлифа – 1 мм) природных стекол, 1 шлиф – техногенное стекло, 1 шлиф – синтетическое стекло:

- 1) снежный обсидиан (западная Мексика (рис. 1)) (1 шт.);
- 2) макузанит (стекло вулканического генезиса; провинция Карабайя, регион Пуно, Перу) (2 шт.);
- 3) ливийское стекло (стекло спорного генезиса; Большое Песчаное Море (Great Sand Sea); граница Египет) (7 шт.);
- 4) иргизит (тектит; из импактного кратера Жаманшин, Иргизский район, Актыобинская область, Казахстан) (1 шт.);
- 5) черный обсидиан (западная Мексика) (1 шт.);
- 6) радужный обсидиан (западная Мексика) (1 шт.);
- 7) влтавит (тектит, Чехия; из импактного кратера Рис, Бавария, Германия) (2 шт.);
- 8) иризирующий обсидиан (серебристый обсидиан, «кошачий глаз», западная Мексика) (2 шт.);
- 9) армянский обсидиан (Армения) (1 шт.);
- 10) индошинит (тектит; Гуанси-Чжуанский автономный район, Китай) (1 шт.);
- 11) обсидиан «Слезы Апачи» (южные США) (1 шт.);
- 12) черный жаманшинит (стекло импактного генезиса; кратер Жаманшин, Иргизский район, Актыобинская область, Казахстан) (1 шт.);
- 13) светлый жаманшинит (стекло импактного генезиса; кратер Жаманшин, Иргизский район, Актыобинская область, Казахстан) (1 шт.);
- 14) тенгизит (стекло техногенного генезиса; нефтегазовое месторождение Тенгиз, Атырауская область, Казахстан) (1 шт.);

15) образец, купленный на минералогической выставке в Мюнхене под названием «Обсидиан», как новая разновидность природного стекла (1 шт.);

16) образец флюоресцентного «стекла» (1 шт.), далее флюоресцентного; является искусственным материалом;

17) тектит (Забайкалье, Россия) (2 шт.).

Один искусственный аншлиф: тенгизит.

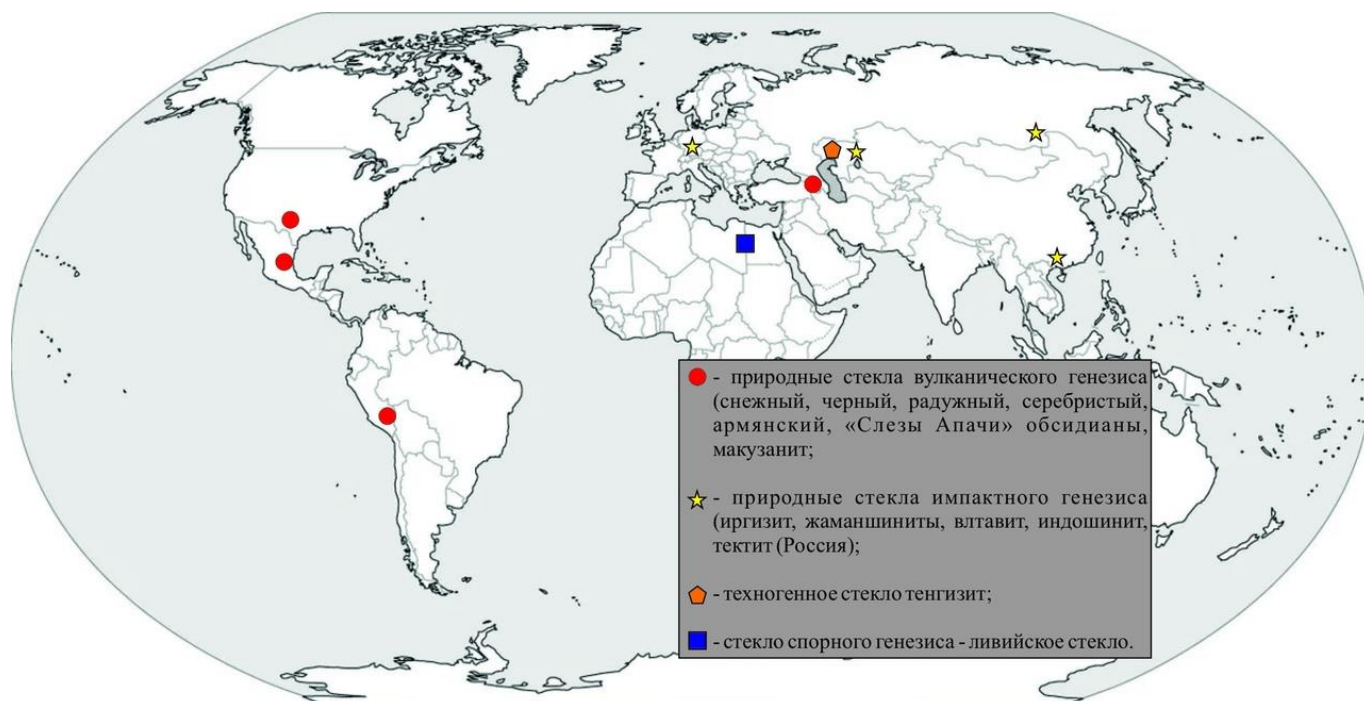


Рис. 1. Местонахождения изучаемых образцов природных стекол и тенгизита.

Образцы макузанита и ливийского стекла предоставлены д. г.-м. н., профессором кафедры минералогии СПбГУ А. Н. Зайцевым. Образцы снежного обсидиана, иргизита, черного обсидиана, радужного обсидиана, влтавита, иризирующего обсидиана, армянского обсидиана, тенгизита, «Обсидиана» и флюоресцирующего стекла предоставлены к. г.-м. н., доцентом кафедры минералогии СПбГУ А. А. Золотаревым. Образцы темного и светлого жаманшинитов и тенгизита предоставлены к. г.-м. н., заместителем директора РЦ Микроскопии и микроанализа СПбГУ С. Ю. Янсон.

Методы исследования:

1) Микроскопические исследования проводились на микроскопе «Полам Р-2Л» на кафедре Минералогии, СПбГУ; на стереомикроскопе LeicaM205 C (Leica, Германия, 2007), на поляризационном микроскопе LeicaDM4500P (Leica, Германия, 2007) и на

конфокальном лазерном микроскопе LEICA TCS SPE (Leica, Германия) в РЦ Микроскопии и микроанализа, СПбГУ.

2) Рефрактометрия проводилась на настольном геммологическом рефрактометре модели RF.5381 на кафедре Минералогии, СПбГУ.

3) Метод гидростатического взвешивания проводился на кафедре Минералогии, СПбГУ.

4) Электронно-зондовый микроанализ проводился на настольном растровом электроном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНІ, Япония) в РЦ Микроскопии и микроанализа, СПбГУ; на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N в РЦ «Геомодель», СПбГУ (Оператор: инженер РЦ «Геомодель» Н. С. Власенко).

5) Спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия) проводилась на экспресс-рамановском спектрометре SENTERRA в РЦ «Оптические и лазерные методы исследования вещества», СПбГУ (Оператор: специалист по экспресс-рамановской спектроскопии РЦ «ОиЛМИВ» А. А. Киреев); на рамановском спектрометре Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800 в РЦ «Геомодель», СПбГУ (Оператор: специалист РЦ «Геомодель» В. Н. Бочаров).

б) Рентгенофазовый анализ проводился на настольном дифрактометре Rigaku «MiniFlex II» в РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования», СПбГУ.

7) Рентгеновская микротомография проводилась на микротомографе Skyscan 1172 (Bruker) в РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования», СПбГУ (Оператор: к. г.-м. н., ведущий специалист РЦ «РДМИ» Л. Ю. Крючкова).

*Благодарности:* автор выражает искреннюю благодарность за неоценимую помощь и поддержку в создании данной выпускной квалификационной работы к. г.-м. н., доценту кафедры минералогии СПбГУ А. А. Золотареву и к. г.-м. н., старшему преподавателю кафедры минералогии СПбГУ Н. И. Пономаревой. Автор благодарит специалиста РЦ «Геомодель» В. Н. Бочарова, инженера РЦ «Геомодель» Н. С. Власенко, специалиста по экспресс-рамановской спектроскопии РЦ «ОиЛМИВ» А. А. Киреева и к. г.-м. н., ведущего специалиста РЦ «Рентгенодифракционные методы исследования» Л. Ю. Крючкову за помощь и консультации по вопросам, касающихся методов рамановской спектроскопии и рентгеновской микротомографии. Автор также выражает благодарность за предоставленные образцы д. г.-м. н., профессору кафедры минералогии СПбГУ А. Н. Зайцеву и к. г.-м. н., заместителю директора РЦ Микроскопии и микроанализа СПбГУ С. Ю. Янсон.



## ГЛАВА 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТЕКЛООБРАЗНОМ СОСТОЯНИИ ВЕЩЕСТВА

Стекла – все аморфные тела, получаемые путем переохлаждения расплава независимо от их химического состава и температурной области застывания и обладающие в результате постепенного увеличения вязкости свойствами механически твердых тел, причем процесс перехода из жидкого состояния в стеклообразно должен быть обратимым (Природные стекла..., 1987).

Природное стекло – это природное твердое образование, не имеющее симметрии дальнего порядка (аморфное); наиболее распространены природные стекла вулканического и импактного генезиса, но возможны иные условия образования.

Принято считать, что вещество находится в стеклообразном состоянии, если значение его вязкости лежит в пределах  $10^{7,6} - 10^{17,0}$  П. При этом, интервал с величиной от  $10^{7,6}$  до  $10^{10,6} - 10^{12,0}$  П обычно обозначается как область размягчения или трансформации (Природные стекла..., 1987).

### Химический состав:

*Кремний* – один из главных компонентов силикатных стекол. Он отличается относительно малым ионным радиусом ( $0,26 \times 10^{-10}$  м) и высокой прочностью связи Si–O. Основная структурная единица, в которой кремнезем выступает в кварцевых и силикатных стеклах, представляет собой тетраэдр, в центре которого расположен атом кремния, а в вершинах – четыре атома кислорода (рис. 2а). Тетраэдры расположены в жесткой трехмерной неперIODической сети. Они группируются в аномальные кольца с шестью элементами, напоминая кольца структуры кристобалита (Природные стекла..., 1987).

Физические свойства чистого кварцевого стекла резко отличаются от свойств силикатных многокомпонентных стекол. В отличие от последних, плотность кварцевого стекла выше у быстроохлажденной модификации, чем у стекла, охлаждаемого медленно; она составляет приблизительно  $2,20 \text{ г/см}^3$ . Прочность при растяжении – 60 МПа.

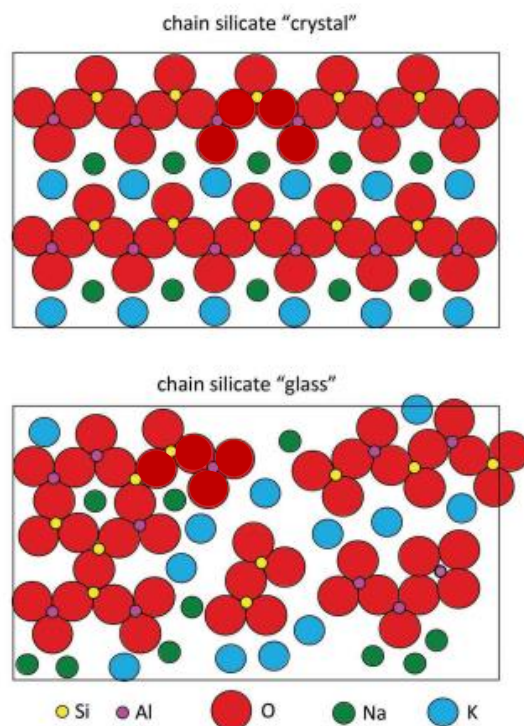


Рис. 2а. Кристаллическая структура «алюмосиликата» и аморфная структура «кислого стекла» (Stebbins, 2016).

*Кислород* образует около 95% объема природных силикатных стекол. Предполагается, что кислород присутствует в стеклах в трех состояниях:

- 1) в виде кислородной сети. В зависимости от состава стекла он в этом случае деформируется катионами, которые в соответствии со своим силовым полем его поляризуют. Степень поляризуемости кислорода оказывает большое влияние на выветривание и растворение стекла;
- 2) как составная часть надстекольной атмосферы. Кислород оказывает влияние на окислительно-восстановительные реакции между составляющими стекла;
- 3) как составная часть газовой фазы пузырьков. Растворимость и диффузия кислорода в стекломассе высокие. Поэтому кислород редко сохраняется в пузырьках природных стекол.

Поляризуемость кислорода имеет особое значение для химической стойкости стекла. В том случае, когда вода воздействует на стекло, происходит поверхностный обмен ионов одновалентных щелочных металлов и водорода, в поляризованный кислород проникает протон и возникает связь ОН. Поляризацией кислорода под влиянием двухвалентного катиона  $\text{Ca}^{2+}$  объясняют также химическую стойкость двухкомпонентных стекол  $\text{M}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ .

*Вода* в стекле присутствует в форме группы OH (рис. 3). Она понижает вязкость стекла, поверхностное натяжение и механическую прочность. У некоторых стекол (система NaO—SiO) вода в значительной степени способствует разделению на несмешиваемые фазы (Природные стекла...,1987).

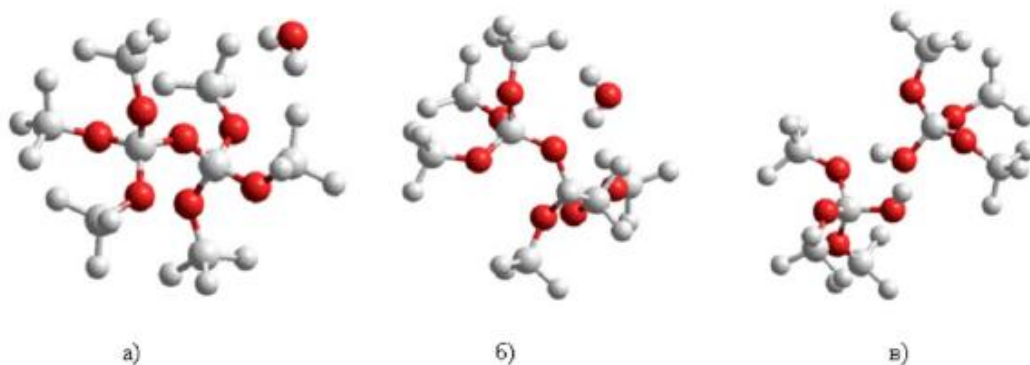


Рисунок 3. Модели для изучения образования гидроксильных групп в природных стеклах при разрыве Si-O-Si связи: а) молекула воды вблизи фрагмента оксида кремния; б) после диффузии молекулы воды к мостиковому атому кислорода; в) после образования двух гидроксильных групп (Воронцов и др., 2010).

*Алюминий* создает в стекле октаэдры или тетраэдры, в зависимости от вида и количества щелочей. При соотношении  $Al_2O_3/N_2O = 1:1$  алюминий обычно существует в тетраэдрической форме. Тетраэдры ( $AlO_4$ ) и ( $SiO_4$ ) близки по размерам и могут быть взаимозаменяемы. Малые количества алюминия (до 40%) увеличивают химическую стойкость стекол, подавляют склонность к кристаллизации, в значительной степени понижают вязкость. Сорбированный  $Al^{3+}$  вызывает изменение знака поверхностного двойного слоя, понижение отрицательного потенциала и в связи с этим и адсорбирующих свойств стекла.

*Калий и натрий* оказывают следующее влияние на свойства стекла.

1. Оба элемента имеют большие диаметры ионов, поэтому понижают плотность и увеличивают удельный объем.

2. Связь кремния с кислородом приблизительно в десять раз более сильная, чем обоих щелочей с кислородом. Низкая прочность связи является причиной того, что оба элемента понижают химическую стойкость стекла.

Щелочи улетучиваются из расплава и имеют тенденцию перемещаться к поверхности стекла:

- 1) натрий по сравнению с калием более электроположительный. В его присутствии в стекле лучше окисляется  $\text{Fe}^{2+}$  на  $\text{Fe}^{3+}$ ;
- 2) калий повышает растворимость кремния в расплаве гораздо лучше, чем натрий;
- 3) большинство натриевых силикатов имеют более низкие точки плавления, чем их калиевые аналоги.  $\text{K}_2\text{O}$  в большей степени, чем  $\text{Na}_2\text{O}$  способствует стеклообразованию;
- 4) калий в большинстве случаев не способствует сепарации на несмешивающиеся фазы и подавляет минерализационное воздействие фтора.

*Кальций.* Активный радиус  $\text{Ca}^{2+}$  близок радиусу  $\text{Na}^+$ , но ионный потенциал у  $\text{Ca}^{2+}$  в два раза больше. Поэтому кальций увеличивает прочность связи в структуре стекла, что находит отражение в различных свойствах стекла.  $\text{Ca}^{2+}$  понижает вязкость расплава при низких температурах и повышает вязкость расплава при высоких температурах.  $\text{CaO}$  способствует проявлению несмесимости в силикатном расплаве. В системе  $\text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$  происходит выделение некристаллической фазы  $\text{SiO}_2$ .

*Магний* в стекле может выступать в тетраэдрической и октаэдрической формах. Характерно, что он находится преимущественно в более высокой координации.  $\text{MgO}$  в системе  $\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$  в значительной степени понижает температуру ликвидуса и скорость кристаллизации. В том случае, когда  $\text{MgO}$  присутствует в стеклах без  $\text{CaO}$ , он повышает температуру плавления. Магний понижает плотность стекол, улучшает механические свойства, по сравнению с кальцием понижает химическую стойкость (Природные стекла..., 1978).

Соответствие свойств стекол их химизму свидетельствует о существовании определенного порядка в строении стекол, но принципы этого порядка не расшифрованы до сих пор.

#### *Кристаллографическая система.*

Стекло структурно – аморфное вещество (рис. 2б), агрегатно относящееся к разряду – твердое тело/жидкость.

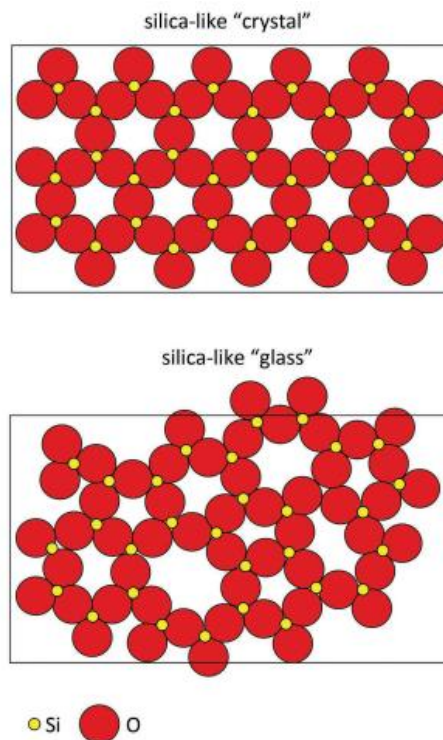


Рис. 26. Кристаллическое строение высококремнистого «кристалла» и аморфное строение высококремнистого «стекла» (Stebbins, 2016).

Оптические свойства:

*Показатель преломления (N):* около 1,5. Зависит от степени поляризуемости стекла и плотности его структуры. В чистом кварцевом стекле поляризуемость низкая, и поэтому кварцевое стекло имеет низкий показатель преломления. У силикатных стекол индекс преломления возрастает с температурой. Из-за того, что N зависит от структуры стекла, большое значение имеет скорость охлаждения. Чем выше скорость охлаждения и меньше степень упорядочения стекла, тем более низкий N.

*Двойное лучепреломление:* изотропное вещество (обычно). Двойное лучепреломление проявляется только тогда, когда стекло подвергается внутреннему напряжению (неоднородности, неравномерному напряжению под воздействием давления, в результате шока, переохлаждения и т. п.). При таком напряжении показатель преломления в направлении растяжения понижается, в направлении, перпендикулярном растяжению, повышается. Если поток света проходит через подобное стекло в направлении, отличающемся от направления оптической оси, наблюдается двойное лучепреломление. Максимум оно достигает тогда, когда поток света проходит перпендикулярно к оптической оси.

*Рассеивание:* Изучение рассеивания света проводится для обнаружения микрогетерогенности стекла. Рассеивание света визуально регистрируется уже тогда, когда центры рассеивания достигают диаметра 10-20 нм. Когда их размер больше, чем 100 нм, и концентрация высокая, стекло кажется помутневшим. При размерах неоднородностей выше 1000 нм стекло непрозрачно.

*Блеск:* в основном, стеклянный.

*Физические свойства:*

*Цвет:* зависит от состава, гомогенизации, степени выветривания, количества кристаллитов и т. п. Разница в цвете стекла отражает различный химический состав. Примеси, придающие стеклу определенный цвет: оксид хрома – зеленый; оксид кобальта – синий; оксиды меди – красный, голубой; оксиды железа – сине-зеленый, коричневый; селен – розовый; оксид урана – желтый; оксид никеля – серо-коричневый, желтый, зеленый, сине-фиолетовый.

При одинаковом химическом составе различия в цвете указывают на различие термальной истории.

*Излом:* в основном, раковистый.

*Плотность:* около 2,5 г/см<sup>3</sup>. Изменение содержания оксидов в стекле сопровождается изменением плотности. Главным препятствием при измерении данного физического свойства является присутствие кристаллитов и пузырьков в стекле.

*Твердость:* 5-7 (по шкале Мооса). Уменьшают твердость стекол оксиды свинца и бария.

*Прочность:* при растяжении в 10-15 раз меньше, чем при сжатии (700-1000 МПа). В сухом воздухе прочность стекла на 45% выше, чем в воде. Окислы кремния и алюминия несколько повышают ее.

*Хрупкость:* очень высокая. Увеличивают показатель хрупкости оксиды магния и бора.

*Вязкость:* низкая. Стекло имеет весьма ограниченную способность к течению (Природные стекла..., 1987).

*Химическая стойкость:* высокая. Понижается с увеличением содержания щелочных оксидов.

*Теплопроводность и термостойкость:* Стекло плохо проводит тепло. Коэффициент теплопроводности стекол 1-1,15 Вт/(м х К). Наибольший коэффициент теплопроводности имеет кварцевое стекло. С повышением температуры теплопроводность стекол увеличивается. Так, при нагревании стекла до его температуры начала размягчения величина ее повышается примерно в два раза. Наибольшей термостойкостью обладает кварцевое стекло, оно выдерживает резкий перепад температур до 1000°С. Снижают показатели теплопроводности и термостойкости оксиды щелочных металлов.

*Технологические свойства:* стекло поддается механической обработке (пилится и режется алмазом), шлифуется и полируется.

*Опасность для здоровья:* природное стекло может иметь острые края, об которые легко порезаться. Также, нельзя измельчать стекло «на сухую», так как длительный контакт с тонкоизмельченным порошком может вызвать легочный силикоз.

## ГЛАВА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СТЕКОЛ

Природные стекла делят на две главные разновидности: земного и лунного происхождения. Существуют также техногенные стекла, которые не входят в данную классификацию. В данной выпускной квалификационной работе затронуты только стекла земного генезиса. Данные о земных стеклах и стекловатых породах позволяют заключить, что образованию стекол и стекловатых пород способствуют четыре геологических фактора:

1. высокое содержание  $\text{SiO}_2$  в расплаве;
2. быстрое остывание расплава;
3. динамика расплава;
4. резкое уменьшение внешнего давления.

Общим для всех природных стекол является и их происхождение из подвижного, в той или иной степени перемещенного расплава. Свидетельство тому – наблюдаемая повсеместно флюидальность (Природные стекла..., 1987).

## 2.1. ИЗВЕРЖЕННЫЕ СТЕКЛА

### 2.1.1. ВУЛКАНИЧЕСКИЕ СТЕКЛА

#### 2.1.1.1. НАЗЕМНЫЕ СТЕКЛА

*Вулканическое стекло* – нераскристаллизовавшийся продукт быстро остывшей лавы, образующийся при закалке (очень быстром остывании) магматического расплава, достигшего земной поверхности [<http://geo.web.ru/>].

*Наземные вулканические стекла основного и среднего состава* обычно не образуют геологических тел, однако в некоторых количествах стекла присутствуют в каждом из таких тел. В лавовых потоках приурочены к донной части (изредка к кровле; еще реже линзы в центральных частях потока). Мощности стекловатых зон составляют от нескольких сантиметров до десятков сантиметров. Подобные зоны распространения стекол сопровождаются высокой пористостью, которая свидетельствует о высокой газонасыщенности и невысоком внешнем давлении при становлении. Для некоторых лавовых потоков вулканов также характерны полости и пещеры (десятки метров в длину и более метра в высоту). В их крыше, дне, стенках наблюдаются «вытеки» лавы из трещин, которые сложены стеклом. Отмечаются стекла в потоках и как один из ингредиентов неполно раскристаллизованной породы. Здесь они слагают матрикс, в который как бы погружены кристаллы. В продуктах взрывной деятельности вулканические стекла образуют концентрические слои в бомбах; слагают пористые обломки в туфах (Природные стекла..., 1987).

*Вулканические стекла кислого и щелочно-кислого состава* распространены значительно шире основных и средних. Зачастую слагают отдельные геологические тела (экструзии, потоки объемом нескольких кубических километров) (рис. 4). Данные стекла резко отличаются от основных и средних изгибающейся полосчатостью. Для кислых и щелочнокислых стекол весьма характерны «фьямме» – лепешкообразные стекловатые включения, погруженные в более кристалличное, как правило, иного химического состава вещество (рис. 5).





Рис. 4. Армянский обсидиан (фото И. П. Второва).



Рис. 5. Фьямме (фото М. А. Вилсона (M. A. Wilson)).

Наблюдаемые в потоке стекла фиксируют различные стадии дифференциации магматического вещества. Приконтактные стекла и стеклованные линзы внутри потоков отражают составы магматического источника, генерировавшего поток. Стекла, слагающие «вытеки» в лавовых пещерах и полостях, определяют состав дифференциатов, возникающих на ранних стадиях эволюции излившейся порции лавы. В стеклах, слагающих матрицу неполнокристаллической породы, «закален» состав и структура остаточного после кристаллизации магматического вещества (Природные стекла..., 1987).

## **ОБСИДИАН**

Наиболее распространенным вулканическим стеклом на Земле является обсидиан.

Обсидиан – это кислое вулканическое стекло, содержащее более 70 %  $\text{SiO}_2$  и не более 1 %  $\text{H}_2\text{O}$  [<http://www.brsu.by/div/geograficheskij-fakultet>]. По классификации

самоцветов Е. П. Мельникова (2010)<sup>1</sup> обсидиан относится к IV группе (Поделочные камни).

Разновидности обсидиана:

- *серебристый/золотистый обсидиан* – обсидиан с эффектом иризации (коммерческое название – «кошачий глаз»). Иризация вызвана упорядоченным расположением газовых (или минеральных) включений, линейно-ориентированных в массе стекла.

- *радужный обсидиан* (обсидиан «Ирис», огненный обсидиан) – обсидиан с эффектом «павлиньего хвоста». Разноцветная иризация обусловлена микровключениями магнетита (Nadin, 2007).

- *армянский обсидиан* (ванакат, «коготь Сатаны») (рис. 4) – разновидность обсидиана с полосчатой текстурой (чередование более темных (до черного) и более светлых (коричневых, горчичных) слоев), которая указывает на направление течения расплава (рис. 6). В Армении месторождения обсидиана приурочены исключительно к склонам и привершинным частям вулканических конусов – Артени, Аднис, Гутанасар, Спитакасар и др. Это молодые (поздненеогеновые) липаритовые вулканы, сложенные шлейфообразными потоками липаритовых, липарит-дацитовых, перлитовых и обсидиановых лав, а также слоями и линзами пемз, туфов, брекчий. Данные породы сформировались в результате многократных извержений, в том числе сильных спазматических взрывов, выбросивших на поверхность огромные массы пирокластического материала. Армянский обсидиан в большом количестве находят на территориях Ирана, Армении, Грузии и Турции.

---

<sup>1</sup> Классификация Мельникова (2010) – классификация самоцветов, в основе которой лежит стоимостный рейтинг камней и их функциональность.

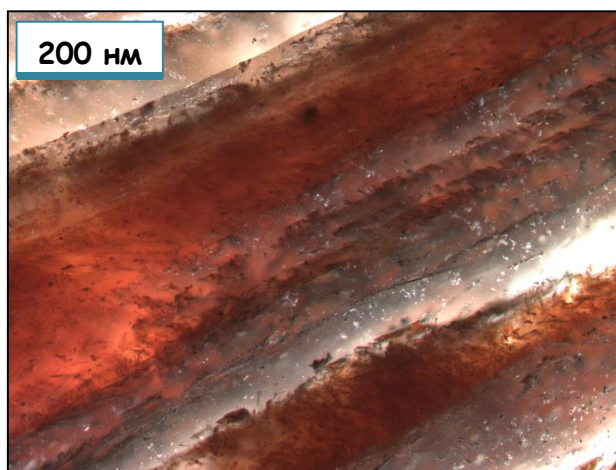


Рис. 6. Полосчатая текстура армянского обсидиана.

- *обсидиан «Слезы Апачи»* – вулканическое стекло, названное по племени индейцев Апачи. На территориях проживания племен был найден данный обсидиан (южные штаты США: Аризона, Нью-Мексико, Техас). «Слезы Апачи» образуются из кислых лавовых потоков, лавовых куполов или пепловых туфов, часто одновременно с серым перлитом. Сферические образования обсидиана встречаются в виде сердцевин в массах перлита, которые концентрически облекают обсидиан, подобно луковой шелухе. Их образование, по-видимому, связано с дифференциальным охлаждением и различным содержанием щелочей и воды в расплаве. Избыток воды, присутствующий во время охлаждения и закалки риолитовой лавы, приводит к гидратации обсидиана (то есть вода, поступающая в стекло, превращает его в перлит). Там, где перлит не полностью гидратирован, обсидиановые ядра обнаруживаются в виде гальки *мареканита* или «Слез Апачи» (Mrazova, Gadas, 2011).

- *снежный обсидиан* – вулканическое стекло с включениями белых «снежинок» кристобалита, которые возникли в результате частичной раскristаллизации стекла (Gimeno, 2003) Месторождения стекла обнаружены в Мексике, на западе США, на севере Аргентины.

Обсидиан образуются при вулканических извержениях, когда происходит быстрое остывание магматического расплава. Скорость охлаждения (и, соответственно, отвердевания) зависит от вязкости магмы, которая, в свою очередь, зависит от химического состава стекла, прежде всего, от содержания кремнезема и летучих компонентов ( $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $CO_2$  и др.).

Безводные и богатые кремнеземом кислые вязкие магмы при переохлаждении легко переходят в стеклообразное состояние, образуя кислые стекла – обсидианы и

перлиты, из которых целиком состоят мощные лавовые потоки и пеплово-пемзовые отложения (рис. 7). Бедные же кремнеземом щелочные базальтовые лавы имеют более жидкую консистенцию. Застывая, они образуют лишь поверхностные корки закалки, когда лава очень быстро охлаждается, изливаясь в водную среду или внедряясь в ледник (Кузьмин и др., 2011).

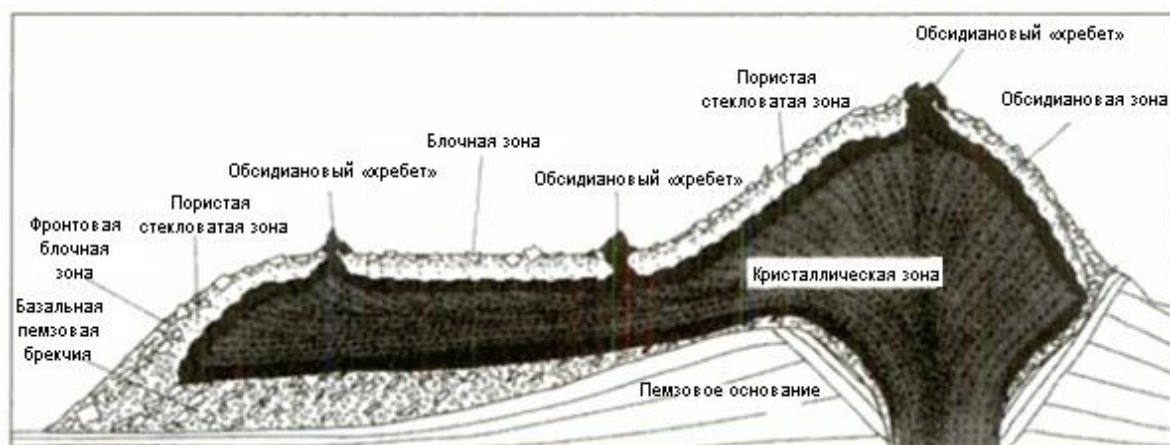


Рис. 7. Схема образования современной риолитовой экструзии, продуцирующей афировый обсидиан (Shackley, 2005).

Образовавшаяся застеклованная масса очень слабо обменивается веществом с окружающей средой, поэтому вулканические стекла несут наиболее полную информацию о составе первичного магматического расплава (Кузьмин и др., 2011). Поэтому многочисленные образцы обсидиана можно распределить по некоторым геохимическим группам. К настоящему времени разработано несколько принципов классификации, основанной на содержании микроэлементов: редкоземельные элементы, комплекс «гафний-рубидий-тантал» (рис. 8) и др. По принадлежности образца к той или иной группе можно судить о его происхождении из соответствующего первичного источника. Это позволяет производить предварительную географическую привязку образцов вулканического стекла, для которых пока неизвестны коренные источники (Grebennikov et al., 2010).

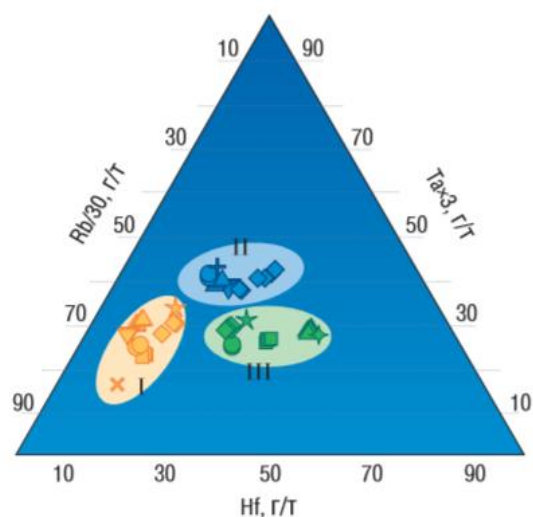


Рис. 8. Диаграмма концентраций трех элементов (Rb-Hf-Ta). Образцы объединяются в компактные кластеры, соответствующие разным зонам Камчатки: I – Восточная Камчатка; II – Южная Камчатка; III – Срединный хребет (Grebennikov et al., 2010).

Благодаря аморфному строению природные стекла, в том числе обсидиан, обладают способностью образовывать при ударе тонкие сколы с острыми режущими краями и легко поддаются обработке. Подобные технологические качества стекол издавна привлекали человека. Начиная с эпохи палеолита, обсидиан был наиболее востребованным сырьем для изготовления колющих и режущих орудий труда – скребков, ножей, наконечников стрел и копий. Немного позже его стали использовать как материал для украшений, ритуальных фигурок, амулетов, каменных зеркал. Поэтому, на многих стоянках каменного века, расположенных в районах активного вулканизма, обнаруживаются предметы быта, изготовленные из обсидиана. Благодаря этому, например, возможно выяснить миграционные пути и способы обмена сырьем, оценить территориальные масштабы и периоды доисторических событий (Кузьмин и др, 2011).

Применение. В современной промышленности обсидианы используются, главным образом, в качестве вспучивающихся наполнителей легких бетонов. Также камень применяется в качестве сырья для изготовления темного стекла и термоизоляции. Физические свойства обсидиана позволяют использовать его в производстве строительных и теплоизоляционных материалов. Обсидиан находит применение в ювелирном и декоративно-прикладном искусстве, некоторые его разновидности используются в качестве поделочного камня.

Имитации. О подделках обсидиана из стекла известно еще из трудов Плиния Старшего, датированных 77 годом н. э. Древнейшей из известных подделок обсидиана



считают глиняную бусинку в обсидиановом ожерелье, которое было найдено при раскопках близ Ниневии. Возраст данной находки около семи тысяч лет. По мнению археологов, это самая ранняя попытка имитации природного камня.

Имитации обсидиана в настоящее время производят из расплавленной смеси вулканического пепла, стекла, песка и других материалов. Они продаются под названиями «хеленит», «радужный обсидиан» и «камень Елены», им нередко приписывается природное происхождение. Под названием «Обсидиан» также продается крапчатый и матовый шлак от стекла. Прозрачные красные, синие, желтые и зеленые «обсидианы» обычно являются искусственно изготовленным цветным стеклом, так как природные прозрачные разновидности чаще встречаются лишь тонкими прослоями, а прозрачные цветные разновидности не обладают насыщенным цветом [<http://geo.web.ru/>].

### ***МАКУЗАНИТ***

Макузанит (рис. 9) – кислое вулканическое стекло с фенокристаллами андалузита и силлиманита, реже – ставролита и кордиерита [<https://www.mindat.org/>]; химически охарактеризовано высоким содержанием алюминия (16-20 масс. %), бора (до 0,6 масс. %), лития (0,7 масс. %), фосфора (0,5 масс. %) и фтора (1,3 масс. %) (Pichavant et al., 1987; London et al., 1988). Первоначально считалось тектитом. (Martin, 1934).



Рис. 9. Вставки макузанита фацетной огранки. Размеры: 17 мм и 14 мм в длину.

Фотография Я. Хирсла (J. Hursl) (Hursl, Zäcek, 1998).

Макузанит – это природное стекло, сходное по составу с редкоземельными гранитными пегматитами. Макузанит является редким примером природного стекла, образовавшегося из богатого литофильными элементами плюмазитового (высокоглиноземистого) расплава (Pichavant et al., 1987). Стекло впервые описано и изучено в Макузани (провинция Карабайя, регион Пуно, Перу). Описание и изучение проводилось в археологических целях, так как макузанит был обнаружен в виде

наконечников стрел из раскопок в Перу и Боливии (Craig et al., 2010). Стекло названо по бассейну реки Макузани, который находится в 200 км на северо-северо-запад от озера Титикака в Перу. Чаще всего, макузанит встречается в виде бледно-желто-зеленой прозрачной эллипсоидной аллювиальной гальки (размеры не превышают 10x5 см) с травленной поверхностью (рис. 10) (текстура поверхности напоминает поверхность зеленых молдавитов-тектитов из Чешской республики, что привело к ошибочному определению генезиса стекла (Barnes et al., 1970)). Природное стекло обычно содержит множество идиоморфных включений микрокристаллов, в том числе редкий минерал виргилит ( $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$ ) и ганит ( $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$ ), для которого макузанит – типовое местонахождение (French, 1978).

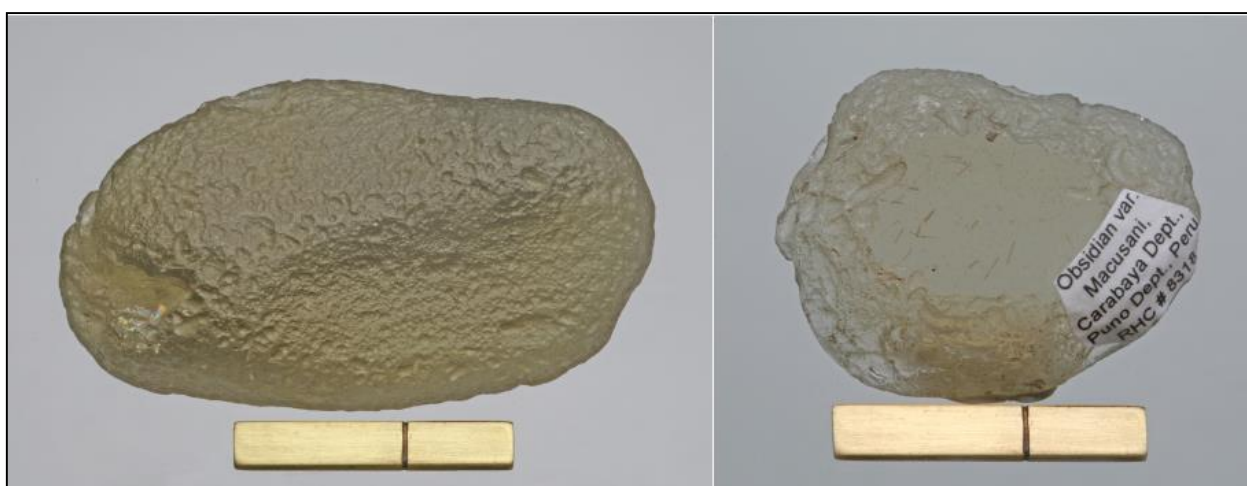


Рис. 10. Макузанит [<https://www.mindat.org>].

Геологически район Макузани относится к западной части Центральных Анд и является частью их внутренней дуги (Clark et al., 1984). В данном районе Бразильский щит субдуцирует под Андский ороген. Данная область отличается от области главной дуги тем, что магматические расплавы в ней имеют преимущественно коровое происхождение (Clark et al., 1984; Kontak et al., 1984). В Западных Кордильерах произошел миоцен-плиоценовый вулканизм, в связи с которым образовались высокоглиноземистые туфы пепловых потоков, в последствие снесенные в три небольших тектонических бассейна: Макузани (крупнейший), Крусеро и Ананеа (Barnes et al., 1970, Noble et al., 1984; Valencia Herrera et al., 1984). Макузанит был обнаружен также в виде включений в туфах в области Чапи (провинция Тамаругаль, регион Тарапака, Чили), в северо-западной части вулканического поля Чилкуно Чико (Chilcuno Chico). Макузанит здесь занимает маленькие полости в туфах, которые выполнены каолином (рис. 11) (Pichavant et al., 1987).

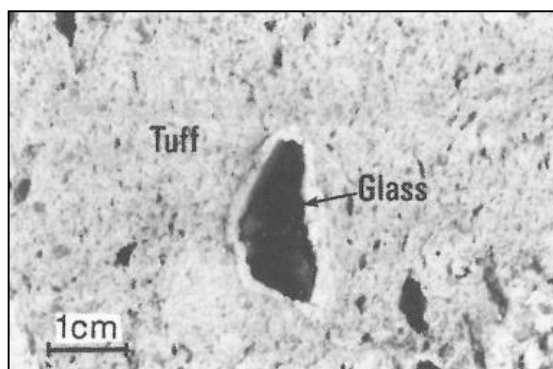


Рис. 11. Включение макузанита в туфе, область Чапи, Чили (Richavant et al., 1987).

Вулканическое поле Макузани (рис. 12) сложено игнимбритами, заполняющими тектонические бассейны в горной цепи Анд, общий объем которых составляет около 430 кубических километров. Область Макузани подстилается осадочными породами палеозоя: на севере встречаются каменноугольные, пермские осадочные и интрузивные (не моложе мела) породы; на юге – верхнемеловые осадочные породы (Barnes et al., 1970).



Рис. 12. Месторасположение вулканического поля Макузани.

«Стекло Паукартамбо» («Paucartambo Glass») из юго-восточной части центрального Перу, вероятно, является одной из первых находок макузанита (Craig et al., 2010). Данное стекло было предложено в качестве стандарта для трекового датирования (Poureau et al., 1993a). В 1964 году макузанит из Калуйо Майо (Caluyo Mayo) (рис. 13) стал одним из



первых образцов, датированных методом треков; возраст составил  $4,3 \pm 0,4$  млн. лет (Fleischer, Price, 1964). В конце 1960-х годов, макузанитовая галька и биотиты из туфов района Калуйо Майо (КМ), восточнее реки Макузани, были датированы К-Аг методом; результаты показали возраст  $4,2 \pm 1,5$  и  $4,1 \pm 1$  млн. лет соответственно (Barnes et al., 1970). Rb-Sr датирование макузанитовой гальки из КМ показало возраст 4,4 млн. лет (Pichavant et al., 1987).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирование показало, что игнимбриты вулканического поля Макузани могли быть извергнуты в три стадии:  $10 \pm 1$ ,  $6,8-8$  и  $4 \pm 1$  млн. лет назад (Cheilletz et al., 1990). В другом исследовании возраст вулканического поля Макузани был определен методом трекового датирования по шести макузанитам из русла реки Чилкуно Гранде (Chilcuno Grande) (рис. 13). У пяти образцов выявлен возраст около  $7 \pm 1$  млн. лет, в то время как у шестого образца –  $4,76 \pm 0,18$  млн. лет (Poureau et al., 1993b). Возможно, макузанит возник при вулканизме 4,8-6,9 млн. лет, также возможно, что не в одну стадию (Poureau et al., 1992). Данный факт объясняет разброс в возрастах образцов (Osorio et al., 2003). Незначительные различия химического состава (вариации содержаний изотопов стронция и кислорода (Pichavant et al., 1987)) среди различных образцов макузанита подтверждают, что они могли образоваться в несколько стадий извержений (Poureau et al., 1993a). Вулканы района Макузани являются самыми молодыми вулканами Кордильеры-де-Карабая. К тому времени, когда они извергались, горный массив уже существовал.

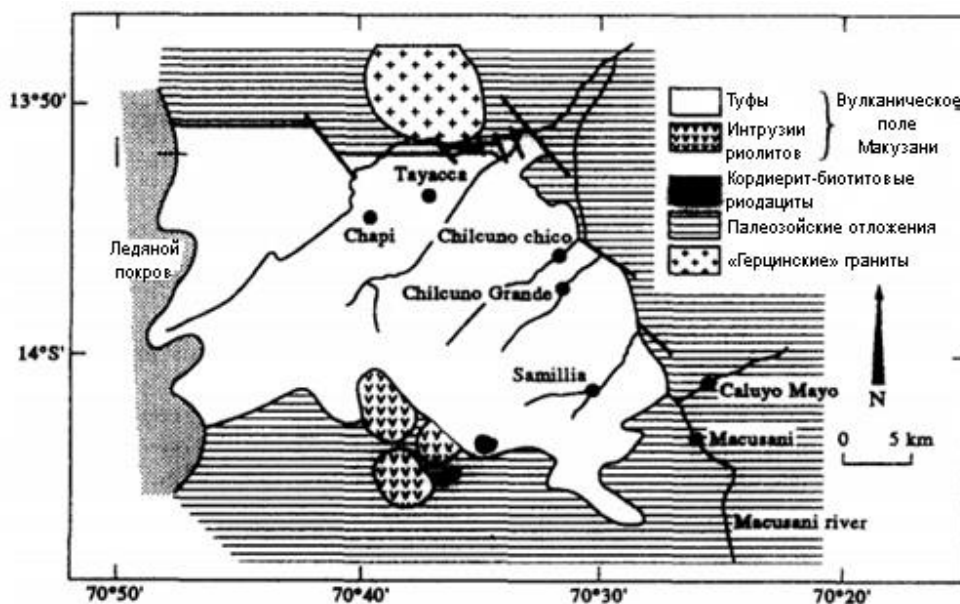


Рис. 13. Схематическая карта вулканического поля Макузани (по Аггоу, 1978).

#### 2.1.1.2. ПОДВОДНЫЕ СТЕКЛА

Подводный вулканизм океанов представлен преимущественно породами основного состава. Породы океанов более стекловаты, чем наземные породы, так как увеличивается

мощность эндоконтактных стекловатых зон, менее кристалличны центральные части потоков. Характерно формирование пиллоу-лав со стекловатой коркой (рис. 14). Описаны также глубоководные протяженные потоки (мощность которых составляет 0,5-3 см) (Мурдмаа, 1973). Они практически целиком сложены стеклом. При соприкосновении пиллоу-лав с водой, в результате растрескивания образуются гиалокластиты, которые представляют собой породы, состоящие из мелких стекловатых коровых обломков (матрикс) и взвешенных в них кусков разорванных подушек. Характерной особенностью гиалокластитов является практически полное отсутствие минеральных фаз (Природные стекла..., 1987).

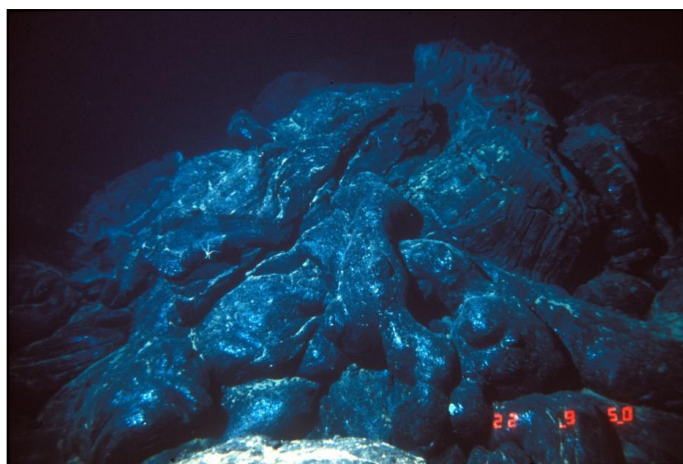


Рис. 14. Пиллоу-лава. Южная часть хребта Хуан-де-Фука (фото: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)).

### 2.1.2. ИНТРУЗИВНЫЕ СТЕКЛА

Существует мнение, что в интрузивном залегании природные стекла не встречаются. Однако детальное прослеживание контактов геологических тел, которые содержат стекла, показало, что во многих случаях, для пород кислого и щелочно-кислого состава, стекловатые тела, ранее рассматривавшиеся как эффузивы, представляют собой интрузивные тела, внедрившиеся в верхние горизонты коры (Фрих-Хар, 1978).

Стековатые *основные* породы встречаются в дайках, реже в силлах, в зонах их эндоконтактов. *Кислые, щелочно-кислые* стекловатые породы в интрузивном залегании слагают жерла, штоки, дайки и пластовые залежи. В пластовых залежах и дайках нередко стекловатая матрица прослеживается на всю мощность (до 10 м). В таких залежах отмечаются горизонты обломочных пород («криптовулканисты», «туффиты»), которые

имеют резкие или постепенные контакты со стекловатыми разностями. Глубина становления подобных стекловатых тел обычно не превышает первых сотен метров (Природные стекла..., 1987).

## 2.2. КРИПТОВЗРЫВНЫЕ СТЕКЛА

### 2.2.1. ФУЛЬГУРИТЫ

Фульгуриты – это стекла, возникающие в результате плавления пород молнией (рис. 15). Они образуются, в основном, за счет песков, также и за счет скальных пород в виде корочек и трубочек (до 10 см длиной и 4 мм в диаметре). Для фульгуритов характерно отсутствие кристаллитов, изохимическое плавление индивидуальных зерен и из-за этого – высокая гетерогенность стекол. Данные характеристики связаны с быстрым плавлением и остыванием пород. Свойства фульгуритов зависят от исходного состава пород мишени и степени их изменения после воздействия электрического тока.

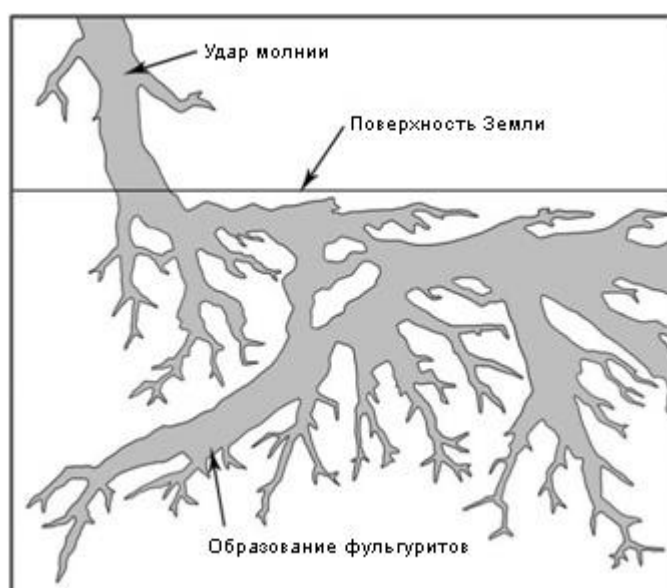


Рис. 15. Образование фульгуритов.

## 2.2.2. ИМПАКТНЫЕ СТЕКЛА

Импактиты образуются при падении на Землю крупных метеоритов. Энергия, которая выделяется при данном процессе, сопровождающемся взрывом, является достаточной для того, чтобы расплавить значительную массу горных пород. При падении метеорита на Землю возникает ударная волна, которая распространяется от локального источника. В нем происходит быстрое выделение энергии со сверхзвуковой скоростью (5-40 км/с). Объем элементов массы среды уменьшается и после снятия давления восстанавливается не полностью (кривая изменения удельного объема в зависимости от давления соответствует ударной адиабате Гюгонио (рис. 16)). При давлениях выше динамического предела упругости происходит интенсивное дробление пород и их пластические деформации, а при предельных давлениях – переход в аморфное состояние. Температура внутри пород повышается за счет разрушения связей, остаточной энергии или тепловых потерь ударной волны, и при 500-1000 Кбар порода мишени плавится. При давлениях >1 Мбара большинство пород испаряется.

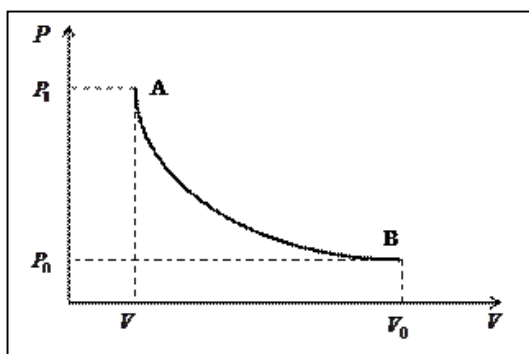


Рис. 16. Ударная адиабата Гюгонио.

За ударной волной следует волна разряжения, распространяющаяся со скоростью, превышающей скорость ударной волны. Волна разряжения постепенно настигает ударную волну, поэтому экстремальное давление уменьшается. Стадия сжатия при ударе относится к надэнтروпийным процессам, в то время как адиабатическое расширение вещества мишени, которое вызвано волной разряжения, относится к изоэнтропийным процессам. Следовательно, распространение ударной волны приводит к возрастанию энтропии. Объем и глубина возникающего при падении метеорита расплава зависят от массы и скорости ударника, а также от свойств пород мишени. Предполагается, что ударник должен экскавироваться взрывом, но его часть может вновь упасть в кратерную воронку и вместе с обломками пород составить аллогенную брекчию (Природные стекла..., 1987).

Таким образом, процесс образования ударного кратера – геологически мгновенное явление, но имеющее последовательные стадии образования (разработана С. В. Киффером с соавторами, 1970-е), которые отличаются по условиям и результатам преобразования вещества ударника и мишени (рис. 17).

*1 стадия – стадия первоначального контакта ударника с мишенью.* Длительность составляет около 1 мс. На данной стадии срезаются неровности с поверхности ударника и мишени до плотного их касания. Происходят такие процессы, как дробление, плавление и испарение пород мишени и ударника. Раздробленный и расплавленный материал выбрасывается из-под ударника в виде кумулятивных струй.

*2 стадия – стадия сжатия метеорита и мишени.* Длительность прохождения ударной волны через ударник до его тыльной стороны – около 100-200 мс. Во время удара вещество сжимается и нагревается. Давление, которое возникает в контактной зоне, может достигать 1500 ГПа, а температура сжатого вещества – десятков тысяч градусов. Происходит врезание ударника в мишень на глубину до 1,5-2,0 раза его первоначальных размеров. Величина врезания зависит от соотношения механических свойств ударника и пород мишени, например, она больше – при ударе металлом по льду, меньше – при ударе металлом по камню.

*3 стадия – отражения и затухания ударной волны.* Длительность составляет около 2-3 с. Ударная волна отражается от тыльной стороны ударника, а затем возвращается к точке удара (передней стороне). В мишени ударная волна проходит максимальное расстояние и угасает, составляя на краю кратера 0,1 ГПа. К концу стадии энергия ударника расходуется и передается породам мишени, которые уже являются импактитами.

*4 стадия – стадия экскавации и перемещения вещества внутри кратера.* Длительность составляет несколько минут до нескольких десятков минут. Данная стадия характеризуется тем, что раздробленный и расплавленный материал пород мишени и ударника перемещается в кратере радиально. Перемещения носят турбулентный характер. Происходит перемешивание обломочного, дробленного и плавленного материала; формируются брекчии и другие породы, которые смешаны по фазовому состоянию вещества и степени нагрева.

*5 стадия – стадия выброса и перемещения продуктов ударного метаморфизма за пределами кратера.* Длительность самого выброса составляет около 7 с (диаметр кратера 1 км), 20 с (10 км), 70 с (100 км). Перемещение и отложение материала занимают значительно больше времени.

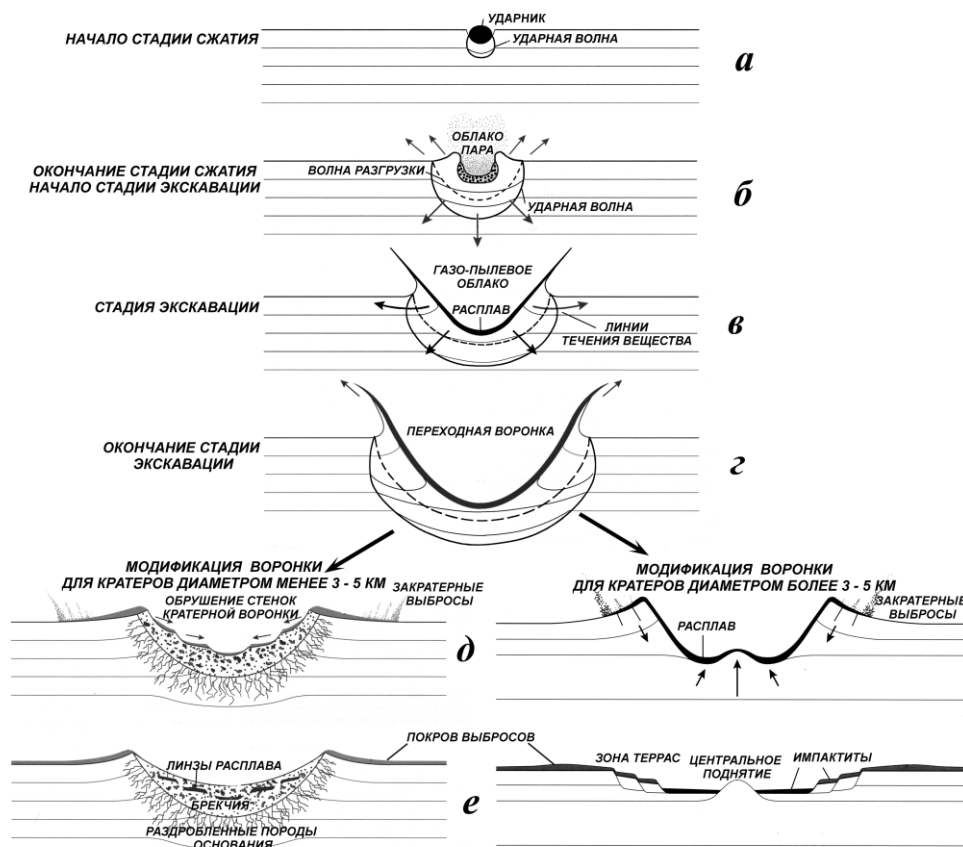


Рис. 17. Схемы, показывающие в разрезе стадии (а-е) формирования взрывных метеоритных кратеров (по French et al., 1998).

Вышеперечисленные стадии последовательно сменяют одна другую в локальной точке кратера, но на его площади осуществляются в одно время. После формирования кратера начинается модификация его структуры, а именно оседание бортов; поднятие центральной горки (либо кольцевое поднятие); центростремительное перемещение импактитов; остывание и кристаллизация импактного расплава; автогидротермальные процессы; заполнение полости кратера водой и осадочным материалом; смыв и переотложение слагающих борта импактитов; захоронение их более молодыми отложениями или эрозия астроблемы. Данные процессы модификации происходят на протяжении миллионов и десятков миллионов лет (Фельдман, Глазовская, 2018).

Международная классификация импактитов составлена таким образом, что она позволяет в единой системе рассматривать импактиты и Земли, и других планет, астероидов (по Фельдман, Глазовская, 2018):

## **I. Импактиты однократного удара**

### *А. Классификация по составу, структуре и ударному метаморфизму*

1. Импактированные породы
2. Расплавные породы (без обломков)
  2. 1. Стекловатые расплавные импактные породы (*импактные стекла*)
  2. 2. Неполнокристаллические расплавные импактные породы
  2. 3. Полнокристаллические расплавные импактные породы
3. Импактные брекчии
  3. 1. Мономиктные (катакластические) импактные брекчии
  3. 2. Полимиктные импактные брекчии
    3. 2. 1. Обломочные импактные брекчии (без частиц стекла)
    3. 2. 2. Зювитовые брекчии (с частицами стекла)
  3. 3. Импактные брекчии с расплавным цементом
    3. 3. 1. Импактные брекчии со стекловатым расплавным цементом
    3. 3. 2. Импактные брекчии с неполнокристаллическим расплавным цементом
    3. 3. 3. Импактные брекчии с полнокристаллическим расплавным цементом

### *Б. Классификация импактитов по форме залегания*

1. Массивные импактиты в, неправильной формы, телах, пластах, линзах, блоках
  1. 1. Автохтонные (аутигенные)
  1. 2. Аллохтонные (аллогенные)
    1. 2. 1. Внутрикратерные (выполняющие кратер)
    1. 2. 2. Закратерные (слагающие выбросы)
2. Дайки импактных брекчий
  2. 1. Дайки обломочных брекчий

2. 2. Дайки зювитовых брекчий
2. 3. Дайки стеклосодержащих брекчий (расплавных импактитов с обломками)
2. 4. Дайки псевдотахилитов (импактных фрикционитов с обломками)
3. Слои с ударнокластическим материалом, выпавшим из воздуха
4. Тектиты

## II. Импактиты многократных ударов

1. Импактный реголит (неконсолидированный ударно-кластический материал)
2. Ударно литифицированный реголит
  2. 1. Реголитные брекчии (с частицами стекла или расплавной матрицей)
  2. 2. Обломочные брекчии (без частиц стекла или расплавной матрицы).

Большинство вариантов систематики и классификации импактитов разработано исходя из общей модели преобразования кратера (рис. 18).

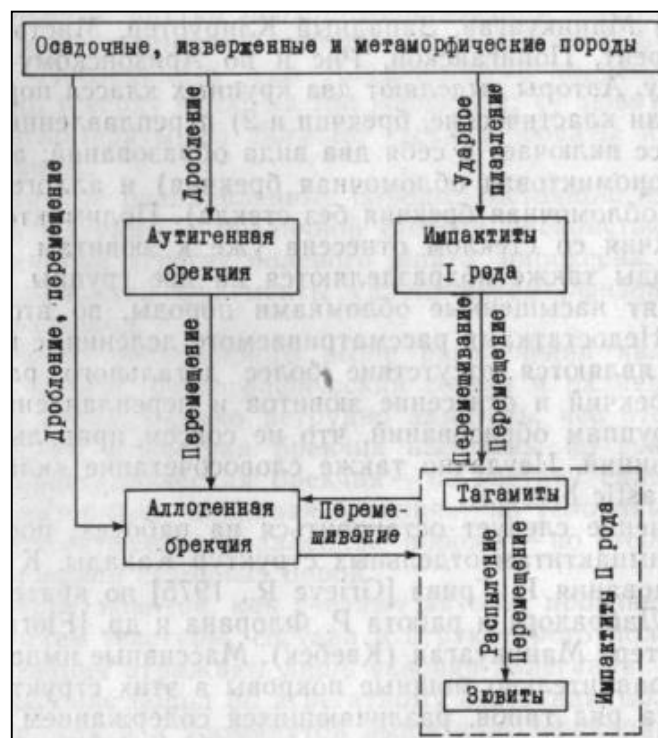


Рис. 18. Принципиальная схема модели преобразований пород мишени при формировании кратера (Структуры..., 1983).

*Аллогенная брекчия* – литоидная брекчия, состоящая из обломков пород различных возраста, состава, размера и степени ударного метаморфизма. Возникает в результате



дробления, переноса и отложения раздробленного и распыленного материала пород мест метеоритных ударов. *Аутигенная брекчия* – литоидная брекчия, чаще мономиктовая, представляющая собой продукт дробления и лишь частичного смещения горных пород от мест метеоритных ударов. В зависимости от физических свойств исходных пород и расстояния, пройденного ударной волной от точки удара, может нести признаки ударного метаморфизма разных ступеней (Shock..., 1968). *Зювит* – импактит тектокластический (с обломочным строением цемента). Термин введен Е. Зауером в 1920 г. Зювит представляет собой брекчию, состоящую из обломков различных размеров, бомб и лепешек полиминерального импактного стекла, смешанного в различных соотношениях с обломками кристаллических пород, и в меньшей степени осадочных пород и минералов, сцементированных тем же тонкораздробленным материалом, литифицированным и иногда вторично измененным. Порода впервые описана в кратере Рис, Германия как наиболее характерное для этой структуры образование (Структуры..., 1983). *Импактит I рода* – ударно-витрифицированная порода, состоящая из мономинеральных неперемешанных стекол плавления и реликтов интенсивно ударно-метаморфизованных минералов, сохранившая первичные текстурные особенности. Возникает при прохождении мощной ударной волны без перемешивания материала расплавленной при этом породы. *Импактит II рода* – импактиты с обломочным (зювиты) или массивным (тагамиты) строением цемента, возникшие при перемешивании материала расплавленных при прохождении ударной волны пород (Масайтис, 1976). *Тагамит* – импактит тектический, обычно массивный, описан в Попигайской астроблеме. Термин широко используется при описании сплошных застывших масс импактного расплава, в разной степени раскристаллизованных. Порода состоит из стекла, микролитов, включений пород и минералов, несущих признаки ударного метаморфизма (Масайтис и др., 1975).

Породы, возникающие из импактного расплава, в зависимости от скорости его остывания образуют стекла либо разнообразные по степени кристалличности, пористости и другим особенностям породы. Расплавные импактиты, обычно, залегают в виде субгоризонтальных или слабонаклонных субпластовых тел. Их мощность достигает десятков и сотен метров. В коптогенном комплексе и в закратерных выбросах распространены бомбы застывшего импактного расплава. Поверхность бомб имеет аэродинамическую скульптуру и поперечные трещины. Данный факт говорит о том, что в полете бомбы испытывали винтообразное вращение и неоднократное растрескивание при закалке. Изучение их распространенности по площади выбросов позволяет устанавливать направление выброса расплава (обломков) и направление падения ударника. В

коптогенном комплексе могут наблюдаться аккреционные бомбы (обломки мишени в стеклянной оболочке) (рис. 19).



Рис. 19. Аккреционная бомба с обломками пород мишени, окруженными каймой стекла (зювит из юго-восточной части астроблемы Попигай) (Фельдман, Глазовская, 2018).

Температура импактного расплава достигает 2200-3000°C в отличие от вулканических расплавов, где она не превышает 1000-1200°C. Остывание расплава в режиме закалки приводит к тому, что стекла различаются пористостью породы и строением самого стекла. Образование пемзы является признаком отделения флюидной фазы от расплава перед его закалкой. Пористость стекол колеблется в широких пределах: от 3-5 % у собственно стекол до 50 %, выше пористость у пемз (Фельдман, Глазовская, 2018).

*Стекла импактных расплавов* характеризуются высокой пористостью из-за того, что формируются в условиях разгрузки давления. Считается, что в крупных метеоритных кратерах расплав остается на дне последних после взрыва. Составы подобных расплавов отвечают составу пород мишени. С ударными процессами связаны *диаплектовые стекла*, которые возникают в результате разупорядочения кристаллической структуры минерала, без нарушения кристаллической формы. Показатель преломления и плотность этих стекол выше, чем у обычных стекол того же состава. С ударными процессами также связаны стекла, возникшие *в результате конденсации силикатного пара*. Подобные стекла, обогащенные кремнеземом (85-95 масс. %), образуют сфероиды и корочки в пустотах и брекчиях (Природные стекла..., 1987).

Выделяют также несколько групп стекол по признакам, зависящим от скорости остывания, которая определяется массой остывающего расплава. К таким признакам относятся: степень полимеризации, степень кристалличности, наличие зародышей минералов:

*Группа А* – расплав имеет однородную, максимально деполимеризованную структуру (в одиночных тетраэдрах содержит Si, Al, Fe, Ti, B, P, Sn, F и другие элементы). Такой расплав характерен для тектитов, тонких (1-2 см) прожилков импактного стекла, мелких частичек стекла в зювитах;

*Группа Б* – расплав имеет определяемую дифрактометрически степень кристалличности 30-40 %, на дооптическом уровне фиксируются плагиоклаз, калиевый полевой шпат, ромбический пироксен. Это – характеристики расплава крупных (3-5 м) бомб, линз и даек (мощностью 1-2 м);

*Группа В* – расплав имеет определяемую дифрактометрически степень кристалличности 60-85 %, на дооптическом уровне фиксируются плагиоклаз (с определением состава и степени упорядоченности), санидин (с количественным определением доли альбита), ромбический и моноклинный пироксены (Фельдман, Глазовская, 2018).

### 2.2.3. ТЕКТИТЫ

Специфической формой расплавных импактитов являются тектиты. Тектиты – мелкие (размером около нескольких сантиметров) тела, имеющие вытянутую или округлую форму. Местонахождения тектитов представляют собой изолированные поля рассеяния. До недавнего времени высказывались различные гипотезы происхождения тектитов. Одна из гипотез предполагает, что тектиты – это фрагменты некой кометы, которые выпали на Землю на огромные расстояния. Данная гипотеза не имеет подтверждения, так как в составе тектитов отсутствует изотоп  $^{26}\text{Al}$ , который образуется при длительной бомбардировке тела космическими лучами. Другая гипотеза, предполагающая то, что тектиты являются вулканическими образованиями – маловероятна, так как тектиты резко отличаются от вулканических стекол (обсидианов) полной обезвоженностью и собственно структурой стекла (Glazovskaya, Golubkov, 1996). *Основная современная гипотеза* происхождения тектитов предполагает образование последних в результате наиболее далекого выброса самых высокотемпературных порций импактного расплава при ударном событии. При выбросе, последующем полете и падении в атмосфере они нередко приобретают округлую, аэродинамическую форму. На Земле до сих пор не обнаружено залежей и крупных глыб тектитов (Фельдман, Глазовская, 2018).

В настоящее время известно восемь полей распространения тектитов (рис. 20, 21):

1) *центрально-европейское поле* (территории Чехии, Германии и Австрии). Распространены тектиты – влтавиты (молдавиты) (по реке Влтава (Молдова), Чехия), они имеют возраст  $15,1 \pm 0,1$  млн. лет (неоген, миоцен). По геохимическим и петрографическим признакам влтавитов доказана их связь с астрблемой Рис (Германия) того же возраста;

2) *австрало-азиатское поле* (территории Индокитайского полуострова, юго-западной части Китая, Австралии, островов Индонезии и Филиппин, а также прилегающих к ним частей Индийского и Тихого океанов). Тектиты – австралиты, индошиниты, яваниты, биллитониты (по острову Белитунг), филиппиниты и некоторые другие имеют возраст около 0,7 млн. лет (квартер, плейстоцен). Кратер, с которым связаны тектиты – не установлен. Предполагается, что кратером может являться котловина озера Тонлесап (Таиланд). Австрало-азиатское поле является самым крупным ареалом распространения тектитов, достигающее в поперечнике 4000 км;

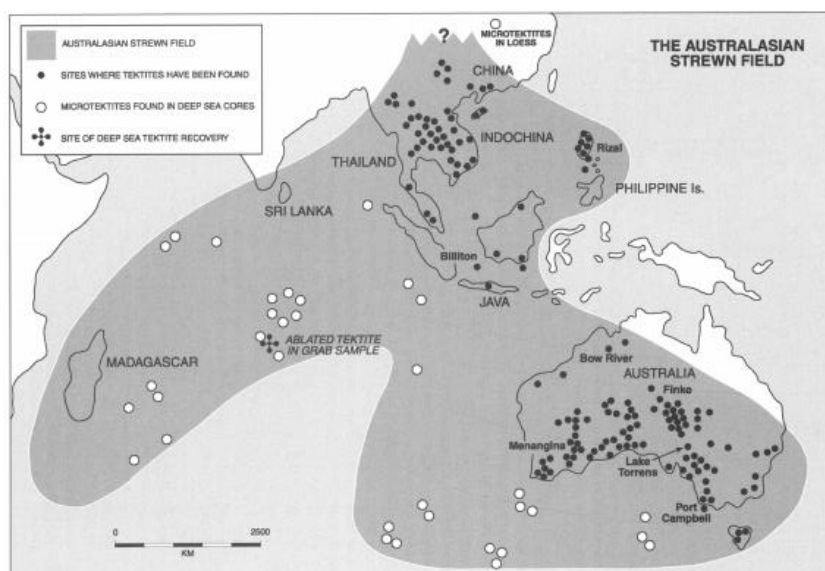


Рис. 20. Австрало-Азиатское поле распространения тектитов (McCall, 2006).

3) *западно-африканское поле* (побережье Гвинейского залива). Тектиты – айвориты (тектиты Берега Слоновой кости или Кот-д-Ивуара). Они имеют возраст около 1,1 млн. лет (квартер, плейстоцен). Доказана связь тектитов с импактным кратером Босумтви (Гана);

4) *северо-американское поле* (территории юго-восточных штатов США и островов Карибского бассейна). Тектиты – бедиазиты (город Бедиаз, Техас) и джорджианиты (штат Джорджия, США) имеют возраст  $34,2 \pm 2,0$  млн. лет (палеоген, эоцен). Они связаны с образованием одновозрастных астроблем Чесапик Бэй (штат Вирджиния, США) и Томс Каньон (штат Нью-Джерси, США);

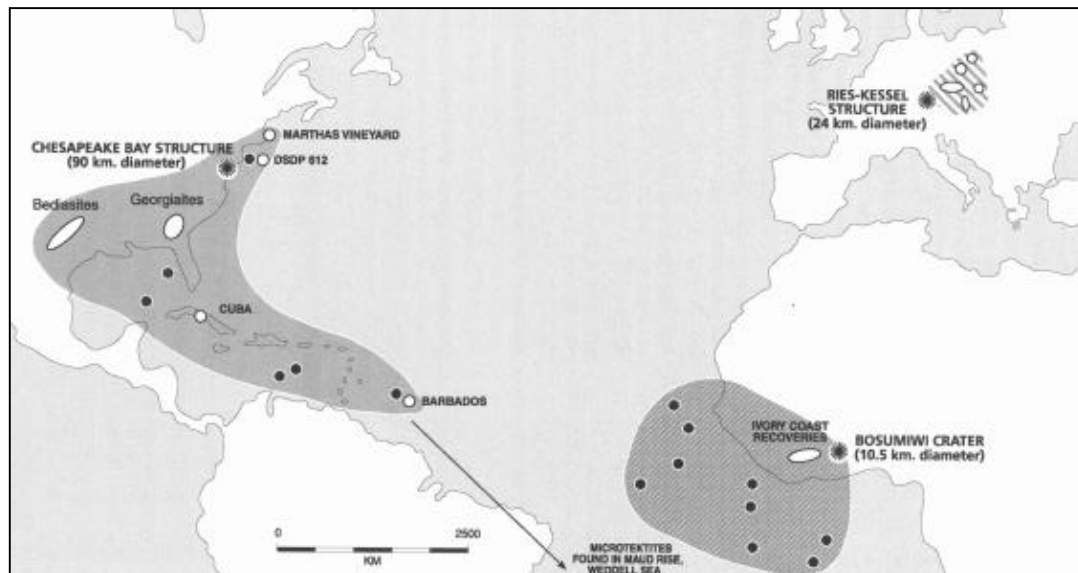


Рис. 21. Центрально-Европейское, Западно-Африканское и Северо-Американское поля распространения тектитов (McCall, 2006).

5) *западно-казахстанское поле* тектитов-иргизитов (по реке Ирғиз) связано с кратером Жаманшин в Северном Приаралье (Казахстан), имеющим возраст около 1,0 млн. лет (квартер, плейстоцен).

6) единичны находки тектитов-уренгоитов (Новый Уренгой, Россия), имеющих возраст  $24,0 \pm 1,2$  млн. лет (палеоген, олигоцен). Не имеют связи с кратерами;

7) единичны находки тектитов в южной части Челябинской области, Россия, имеющих возраст  $6,2 \pm 0,3$  млн. лет (неоген, миоцен). Не имеют связи с кратерами;

8) единичны находки тектитов в Гватемале (Южная Америка) с возрастом около 0,8 млн. лет (квартер, плейстоцен). Не имеют связи с кратерами.

В пределах полей рассеяния тектиты распределяются по площади неравномерно: пятнами и полосами, создавая при этом радиальную зону выброса импактного расплава (Фельдман, Глазовская, 2018). Данная зона выброса была подтверждена компьютерным моделированием удара для влгавитов (рис. 22). Н. Артемьева с соавторами (2002) выяснили, что тектиты формируются на начальных этапах роста кратера из выбросов расплава, имеющих промежуточную скорость. То есть, расплав со скоростью менее 2 км/с

отлагается в кратере или около него, а выбрасываемый со скоростью более 11 км/с – покидает планету (Artemieva et al., 2002).

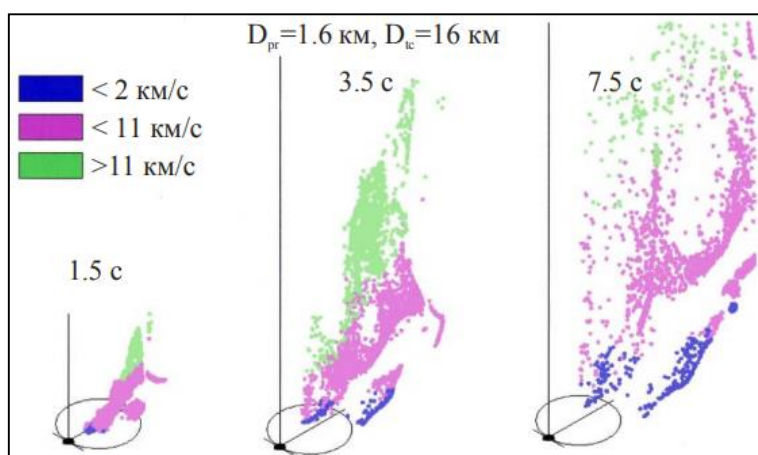


Рис. 22. Численное моделирование образования поля рассеяния влтитов при формировании астроблемы Рис (Германия). Ударник – 1,6 км, угол удара –  $30^\circ$ , скорость удара – 20 км/с (Artemieva et al, 2002).

Размеры тектитов, в среднем, составляют несколько сантиметров. Размеры и масса уменьшаются по мере удаления от кратера, также меняется их форма. Например, в австрало-азиатском поле, где материнский кратер неизвестен, изменения размеров и массы установлены в направлении с северо-запада на юго-восток (рис. 23).

На поверхности тектитов наблюдается характерная аэродинамическая текстура – борозды и валики, и штриховка, свидетельствующая о вытягивании пластичных частей расплава при полете сквозь атмосферу. Это движение сопровождается вращением вокруг длинной оси. Также на поверхности тектитов фиксируются микрошарики, внутри – пустотелые, названные П.В. Флоренским «налипушками» (рис. 24). Ранее предполагалось, что тектиты (например, иргизиты) аккрецируются из микрошариков конденсата в горячем облаке на растущей астроблеме. По современным представлениям более вероятным механизмом формирования тектитов является не аккреция капель, а наоборот, продолжение испарения капель расплава в облаке перегретого пара. При данном процессе происходит отделение микрокапель расплава от будущего тектита, которые вытягиваются из тектита пузырьками газа и постепенно теряют связь с последним (Фельдман, Глазовская, 2018).

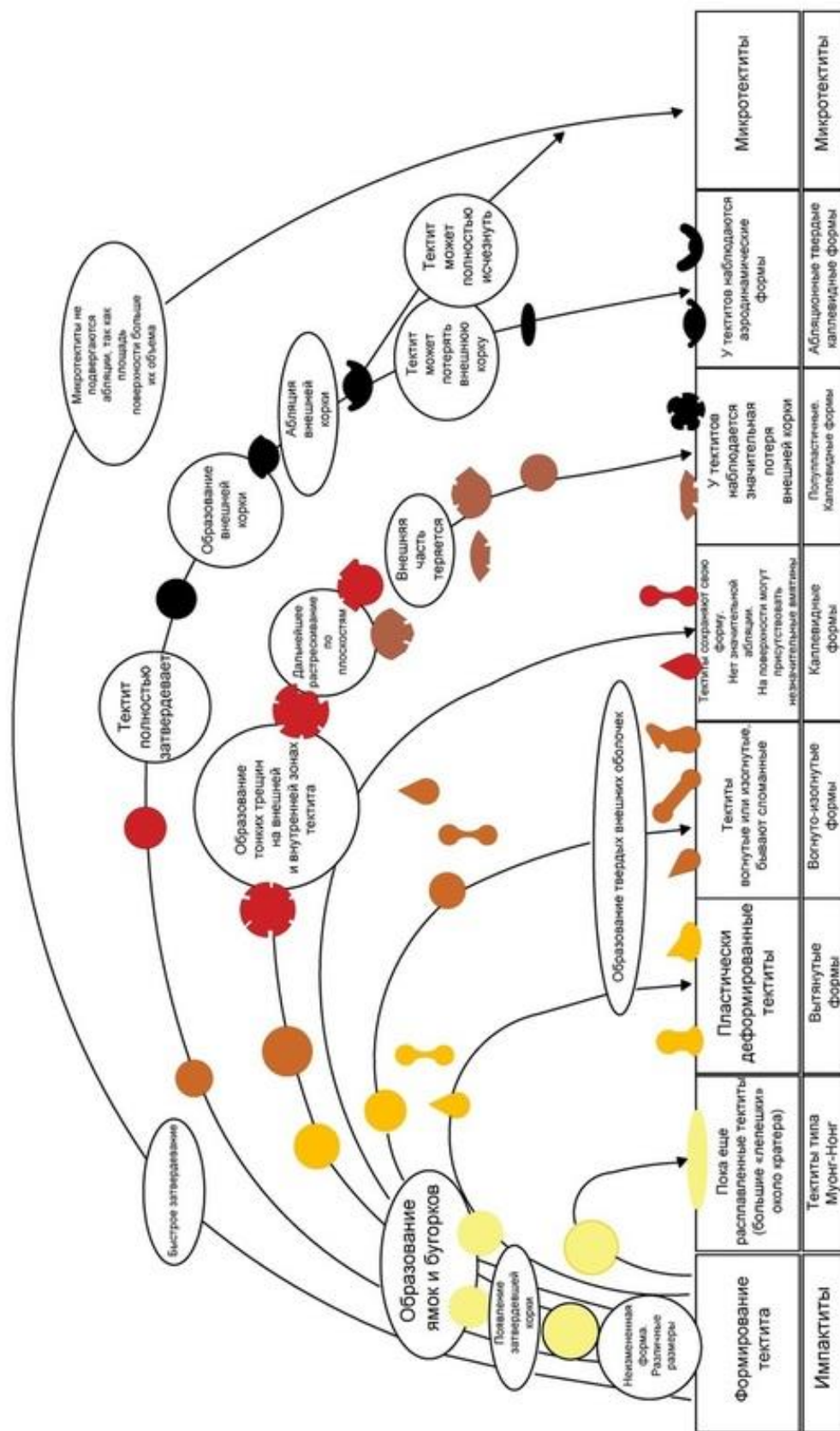


Рис. 23. Предложение формирования и подразделения австралийских тектитов [по <https://www.tektites.info/>].

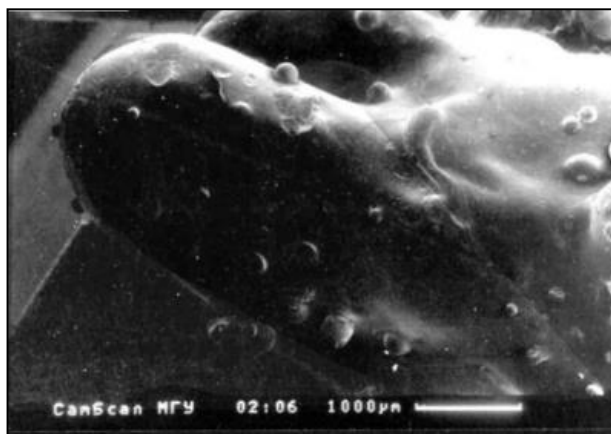


Рис. 24. Иргизит, покрытый шариками-«налипушками» (Фельдман, Глазовская, 2018).

### ***КРАТЕР ЖАМАНШИН***

Астроблема Жаманшин (урочище Жаманшин) расположена в 180 км к северу от Аральского моря (N 48° 24'; E 60° 58'). Она представляет собой округлую впадину диаметром 5,5 км. Ранее считалось, что урочище Жаманшин относится к вулканическим образованиям (Пилия, 1961). Но в 1969 году П. В. Флоренский высказал предположение об импактном происхождении данной структуры (Кирюхин, Флоренский и др., 1969). В Жаманшине выявлен произошедший при импакте процесс – расплавы различных пород не успели перемешаться, поэтому на данный момент они отражают состав различных пород мишени. Данные расплавы относятся ко второму типу (Фельдман, Глазовская, 2018).

Северное Приаралье геологически принадлежит к эпипалеозойской Туранской платформе. Фундамент платформы представляет собой систему складок северо-восточного простирания, он сложен кварц-хлоритовыми, хлорит-эпидот-кварцевыми, актинолит-альбит-эпидотовыми сланцами венда-нижнего кембрия; кварцит-филлитовыми и кварцит-серицитовыми сланцами нижнего кембрия; верхнепалеозойскими слабометаморфизованными эффузивами, туфопесчаниками, туфоконгломератами с прослоями известняков. Осадочный чехол представлен меловыми глинами, песчаниками, мергелями и известняками (мощность около 50 м) и палеогеновыми (эоценовыми и олигоценными) песчано-глинистыми отложениями (мощность около 150 м), общая мощность не превышает 200 м (рис. 25) (Масайтис и др., 1980).



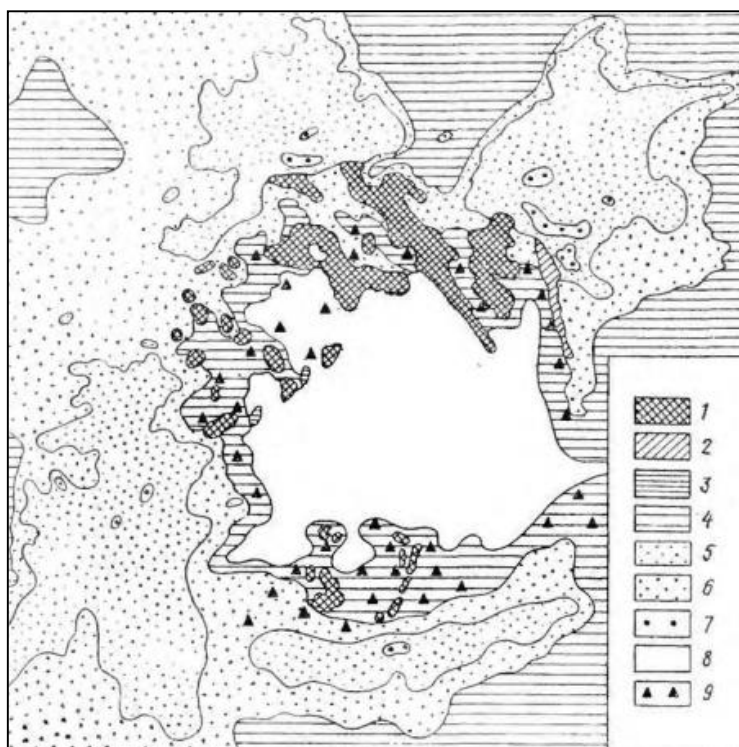


Рис. 25. Схема кратера Жаманшин (Флоренский, 1975; Масайтис, 1980). 1 – аллогенная брекчия с обломками и глыбами сланцев, андезито-базальтов, андезитов, яшм и кремней нижнего и среднего палеозоя; 2 – аллогенная брекчия с обломками вулканических пород верхнего палеозоя; 3 – меловые песчаники, глины, мергели, известняки; 4 – эоценовые пески и глины; 5 – эоцен-нижний олигоцен (глины); 6 – средний олигоцен (глины, пески, песчаники); 7 – верхний олигоцен (песчаники, гравелиты); 8 – четвертичные лессы; 9 – жаманшиниты и иргизиты.

Самой распространенной в кратере Жаманшин является разновидность черного шлакоподобного стекла, которое содержит в себе обломки пород и минералов – жаманшинит, относящийся к тагамитам. Тектиты иргизиты обнаружены в юго-восточной части структуры (размеры не превышают 2-3 см). Геологическое положение импактитов и брекчий, а также результаты определения радиологического и трекового возрастов указывают на то, что астроблема Жаманшин образовалась около 1,0 млн. лет назад, то есть в плейстоцене (Фельдман, Глазовская, 2018).

Мнения по вопросу о *типе ударника* расходятся. Некоторые исследователи считали, что ударником является хондрит (Bouska et al., 1981; Glass et al., 1983), другие утверждали, что ударником является каменный (Флоренский, Дабижа, 1980) или железный (Taylor, McLennan, 1979) метеорит. Существует мнение, что иргизит образован тектитоносной кометой, которая разрушилась в атмосфере и не достигла поверхности Земли (Изох, 1991). В XXI веке количество гипотез стало намного больше. Например,

некоторые авторы пришли к выводу, что кратер Жаманшин был создан при падении примитивного ахондрита, а именно лодранита (Vetvicka et al., 2010) – примитивный ахондрит, образующийся в результате частичного плавления хондритов на раннем этапе образования Солнечной системы (Parike et al., 1995). Позднее Дж. Мизера с соавторами (Mizera et al., 2012) сделали выводы, что ударником мог быть обычный хондрит, вероятно, класса L6 или L5. Т. А. Горностаева с соавторами (Gornostaeva et al., 2018) придерживаются кометной гипотезы образования кратера Жаманшин, но уточняют то, что комета достигла поверхности Земли, и иргизиты образовались в результате ее наземного взрыва (рис. 26) (по Горностаева, 2016).

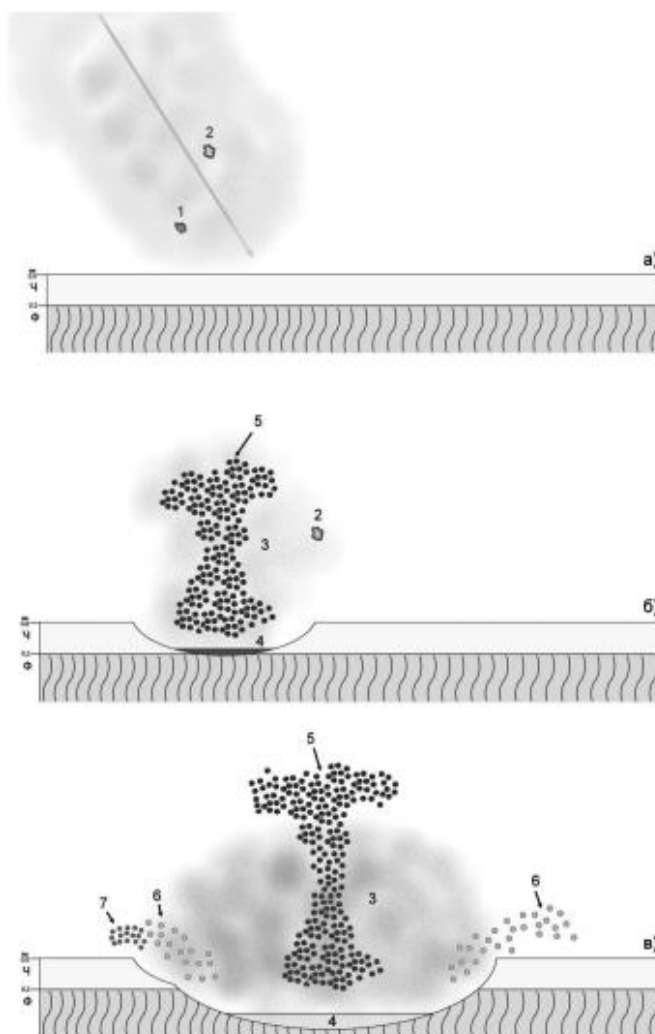


Рис. 26. а) Момент подлёта кометы к земной поверхности; б) Момент сразу после взрыва первого импактора; в) Момент после взрыва второго импактора. Ч – породы осадочного чехла; Ф – породы фундамента. 1 – первый импактор; 2 – второй импактор; 3 – газополазменное облако от взрыва первого импактора; 4 – расплав; 5 – дроблёный материал, выброшенный взрывом вверх и позднее упавший в кратер; 6 – дроблёный материал, содержащий жаманшиниты, выброшенный взрывом в стороны; 7 – иргизиты.

## КРАТЕР РИС

Астроблема Нердлингенский Рис (или просто Рис) расположена в 110 км к северо-западу от Мюнхена (Preuss, 1969) (N 48° 53'; E 10° 37'). Ее диаметр составляет около 24 км, глубина до 750 м. Она представляет собой круглую котловину с плоским дном. Ранее кратер Рис считался мааром, но в 1904 г. Е. Вернером (Werner, 1904) было высказано предположение об его импактном происхождении. Строение территории типично для платформ: на кристаллическом фундаменте (гнейсы, амфиболиты), прорванном гранитоидами, залегает осадочный чехол (мощностью около 500-600 м): триасовые отложения аргиллитов и песчаников, юрские аргиллиты, мергели, известняки, песчаники и кайнозойские известняки, бурые глины и бурые угли (Масайтис и др., 1980; Хрянина, 1987) (рис. 27).

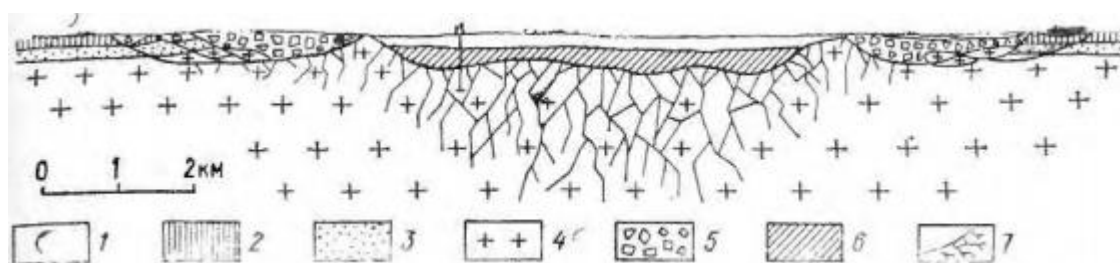


Рис. 27. Обобщенный разрез астроблемы Рис (Pohl et al., 1977; Stahle, Ottemann, 1977 с изм.). Скв. Нордлингер-73. 1 – заполняющий комплекс (верхнемиоценовые гипсоносные песчаники, битуминозные мергели, сланцы, глины, доломиты); 2-4 – цокольный комплекс (2 – юрские аргиллиты, мергели, известняки, песчаники, верхнеолигоценовые и среднемиоценовые пресноводные известняки, мергели, глины, бурые угли, 3 – триасовые аргиллиты и песчаники; 4 – докембрийские амфиболиты и гнейсы и граниты); 5, 6 – коптогенный комплекс (5 – аллогенная брекчия, 6 – зювиты); 7 – катаклаз и брекчирование в породах цоколя (аутигенная брекчия).

При петрографическом изучении гнейсов из аутигенной брекчии скважины Нордлинген-73 (рис. 27) А. Эль-Гореси (El Goresy, Chao, 1977) и Э. Чао (Chao, El Goresy, 1977) были обнаружены пылевидные частицы метеоритного вещества, которые встречаются в межзерновых трещинках силикатных минералов, а также в трещинах спайности. Относительно большое количество хрома, присутствие кальция и отношение  $Ni/Co = 20$  являются предпосылками к тому, что метеорит, создавший кратер Рис, по классификации А. Н. Крота (Krot et al., 2014) относится к дифференцированным ахондритам – обритах (Масайтис и др., 1980; Хрянина, 1987).

К продуктам дальних выбросов импактного расплава из кратера Рис относят тектиты (влтавиты или молдавиты (рис. 28)). Влтавиты относятся к Центрально-Европейскому полю рассеяния. Граница находится в 256 км к востоку от центра кратера. Поле имеет протяженность 150 км в восточном направлении и ширину 32 км (Масайтис и др., 1980). Возраст молдавитов, а также самой астроблемы –  $15,1 \pm 0,1$  млн. лет (по Фельдман, Глазовская, 2018), то есть миоценовый.



Рис. 28. Влтавит. Фотография С. Мерсера (C. Mercer) [<https://www.mindat.org/>].

В 40 км к западу от кратера Рис находится одновозрастная с ним астроблема Штейнхейм. Она имеет диаметр около 3,4 км и глубину около 220 м (Reiff, 1977). Кратер Штейнхейм находится в тех же геологических условиях, что и Рис. Предполагается, что астроблемы Штейнхейм и Рис образовались одновременно в результате двойного удара (Масайтис и др., 1980).

### ***ЛИВИЙСКОЕ СТЕКЛО***

Ливийское стекло (рис. 29) обнаружено на юго-западе Египта (область размерами  $6500 \text{ км}^2$ ) (рис. 30) в 1932 году Египетской службой пустыни (Egyptian Desert Survey) под руководством П. А. Клейтона (Clayton, Spencer, 1934). Ливийское стекло уникально для данной местности, несмотря на то, что его фрагменты были транспортированы древним человеком на территории современной Ливии (неопубликованная информация (Squyres, 1978)), а также в южную часть Египта, западнее Нила (Spencer, 1939). Содержание кремнезема в ливийском стекле составляет около 98 масс. %. Его цвет варьирует от соломенно-желтого, светло-зеленого до серого. Прозрачность – от чистого до мутного. Твердость, как и у других стекол, равна 6 по шкале Мооса (Derek et al., 1982). Температура плавления ливийского равна температуре плавления чистого кремнезема –

1727-1713°C, выше на 500°, чем у других природных стекол (по Скрипко и др., 2017). В отличие от тектитов ливийское стекло не имеет признаков абляции, которые свидетельствуют об их полете в атмосфере на большие расстояния (O’Keefe, 1976). Существует гипотеза о том, что ливийское стекло представляет собой импактит, образовавшийся при быстрых плавлении и застывании богатого кварцем нубийского песчаника (Nubian Sandstone) (рис. 31), последовавших сразу после импактного события (Kleinmann, 1968; Frohlich et al., 2013), но доказательств данному предположению нет (Derek et al., 1982). Существует также теория о том, что ливийское стекло имеет вулканический генезис (Brugge, 2006).



Рис. 29. Ливийское стекло [<https://rruff.info/>].

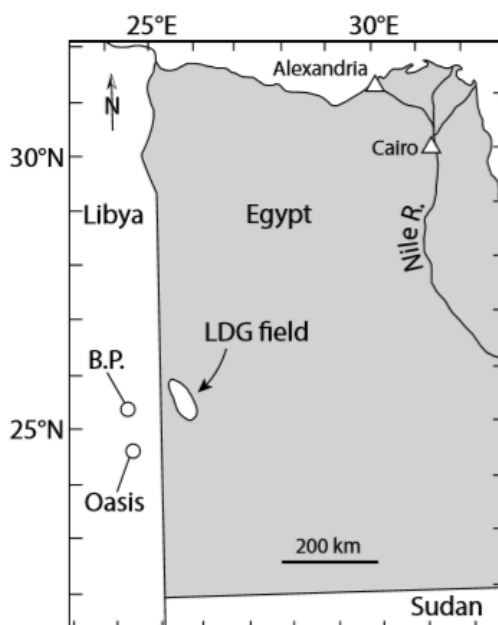


Рис. 30. Карта, показывающая расположение поля ливийского стекла (LDG) в западной части Египта (по Koeberl, 1997; Savosie, 2019). Также изображены два импактных кратера, предположительно, образовавших стекло (В. Р. ( $D = 2$  км) и Оазис (Oasis) ( $D = 18$  км)) (Abate et al., 1999).

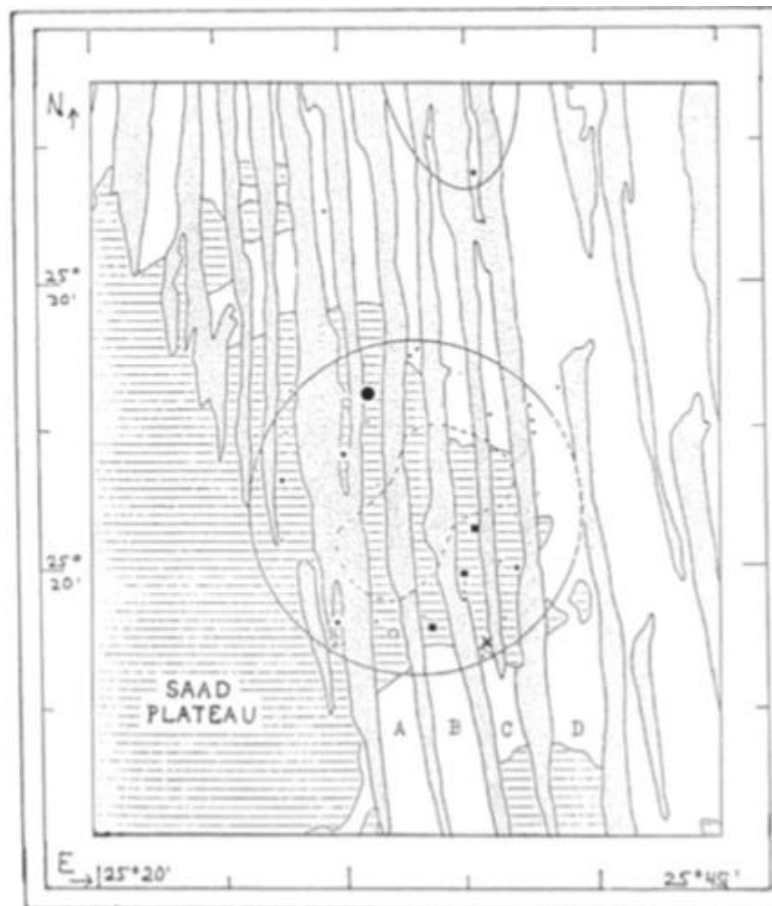


Рис. 31. Схема расположения поля ливийского стекла в южной части Большого Песчаного моря (Great Sand Sea) на юго-западе Египта. Окружность – распространение фрагментов ливийского стекла. А, В, С, D – области между песчаных дюн. Горизонтальные линии – меловые песчаники («Нубийские»). Закрашенная область – движущиеся с севера на юг дюны. Черные точки – заболоченные и гравийные области. Области х – места отбора образцов ливийского стекла (по Klitzsch et al., 1987; Barakat et al., 1997).

Астроблема, приведшая к образованию ливийского стекла, не была научно подтверждена, как и признаки ударной деформации в самих стеклах, поэтому была сделана гипотеза о том, что стекло образовалось вследствие взрыва в атмосфере ~ 100 Мт (1 Мт =  $4,184 \cdot 10^{15}$  Дж). При данном процессе не образуются кратер и метаморфизованные импактом минералы, но происходит высокотемпературное плавление поверхностей пород (Wasson, 2003; Boslough, Crawford, 2008).

Возраст стекла определен методом трекового датирования в 28,5-29 млн. лет, то есть олигоценый (Genter et al., 1969; Storzer, Wagner, 1971; Koeberl, 1997).

## 2.3. ТЕХНОГЕННЫЕ СТЕКЛА

### *ТЕНГИЗИТ*

Тенгизит является самым известным стеклом техногенного генезиса. Данное стекло является продуктом нефтяного пожара на скважине месторождения Тенгиз в Казахстане. Возгорание произошло по причине повышенного пластового давления (превышающего гидростатическое давление в два раза), высокой газонасыщенности пластовой нефти, наличия твердых битумов в продуктивных карбонатных коллекторах и высокого содержания сероводорода и углекислого газа в нефти. 26 июня 1985 года открытый фонтан газа и нефти на западном фланге месторождения, на скважине № 37, самовозгорелся; в июле 1986 года пожар на скважине был ликвидирован.

Пожар расплавил суглинистые пески вокруг скважины (температура около 1200°C), которые образовали овальное «озеро» расплава (размеры 52 x 75 м). Расплав впоследствии превратился в частично раскристаллизованное стекло – тенгизит (рис. 32). Минеральный состав песков, подвергшихся плавлению, следующий: кварц, кальцит (в раковинах моллюсков), иллит, анортит, хлорит, галит. «Озеро» тенгизита ограничено мезолитовыми уступами высотой 40-45 см на западе и до 1,5 м на востоке. Мезолит – это вспученная пористая тридимит-кварцевая порода с анортитом и кальцитом (рис. 33) (Потапов и др., 2001).

Цвет тенгизита варьирует в широких пределах: от бурого, черного, синего до голубого, бело-голубого. Структура, обычно – витрофировая; текстура – массивная. По химическому составу тенгизит относится к андезит-дацитовым стеклам; он практически безводный. Аморфная масса содержит раскристаллизованные включения диопсид-воластонитовых сферолитов и прожилков, выделения кварца на стенках газовых пузырей, микрокристаллы кварца, тридимита, анортита и магнетита. По классификации самоцветов Е. П. Мельникова (2010) тенгизит относится к IV группе (Поделочные камни), как обсидиан и другие природные стекла. Имеет ряд синтетических имитаций, обычно ими являются шлаковые стекла (Потапов, 2012).

Тенгизит является индикатором высокотемпературных техногенных процессов. Техногенное стекло обладает такими свойствами, как: инертность в реакционной окружающей среде, стойкость к тепловым воздействиям и долговечность. Данные свойства могут быть использованы для захоронения ядерных отходов, производства полупроводников, для изготовления стоматологических протезов (по Потапов и др., 2001).



Рис. 32. Тенгизит (Kokh et al., 2016).

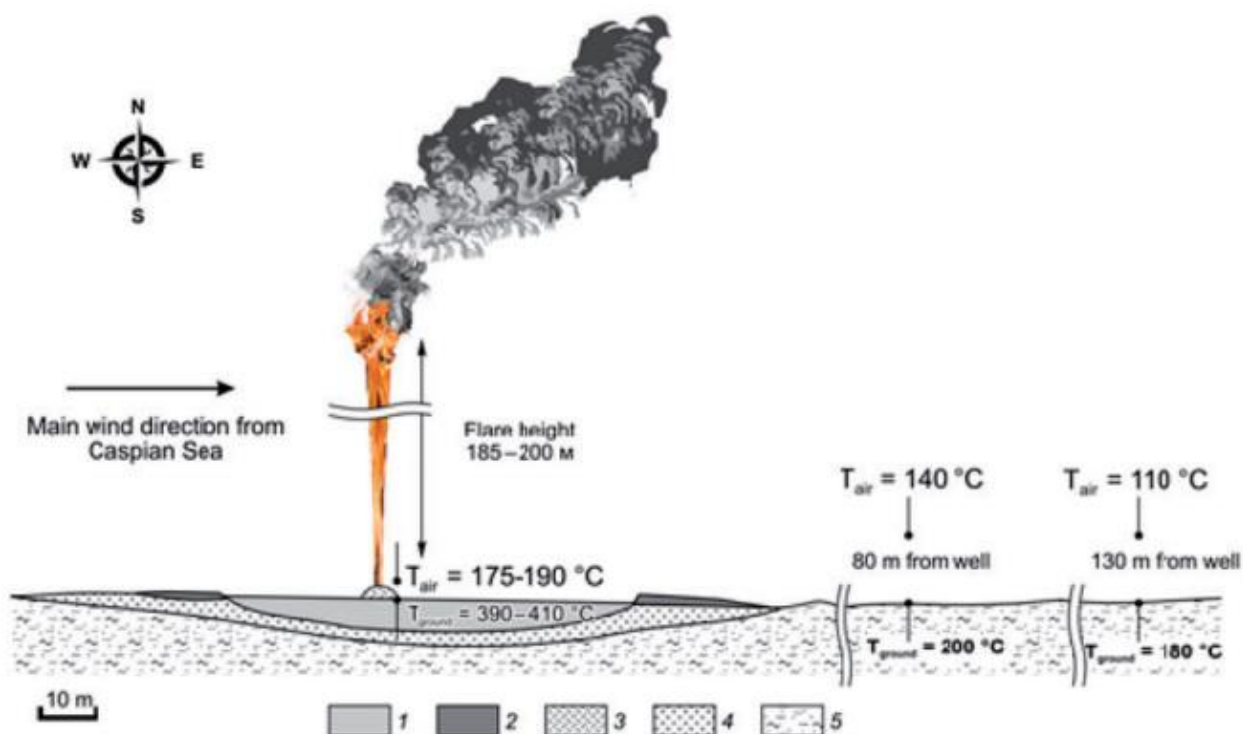


Рис. 33. Геологическая позиция техногенных пород в зоне нефтяного пожара и моделирование взрыва (с 10 сентября 1985 г. по 27 сентября 1986 г.). 1 – тенгизитовое «озеро»; 2 – мезолитовые уступы; 3 – обломки тенгизитов; 4 – мезолитопесчаники (термопесчаники); 5 – неизмененные суглинистые пески. Стрелкой с запада на восток указано преобладающее направление ветра с Каспийского моря. Указаны измеренные температуры воздуха и земли в 80 и 130 м от скважины (Потапов и др., 2001; Kokh et al., 2016).



## ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 3.1. ФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ

В ходе исследовательской работы были изучены некоторые физические и оптические свойства природных стекол и тенгизита. Уже на первом этапе изучения, на макроскопическом уровне, наблюдаются геммологические отличительные признаки, такие как цвет и прозрачность. Они позволяют идентифицировать предположительный генетический тип стекла. К примеру, темно-зеленый прозрачный влтавит импактного генезиса контрастирует в сравнении с черным непрозрачным обсидианом вулканического генезиса. Но только лишь по макроскопическим признакам определить генезис стекла невозможно. Влтавит и макузанит очень схожи по цвету, блеску, прозрачности, излому, твердости, но имеют совершенно различный генезис: молдавит является тектитом, а макузанит – вулканическим стеклом. Черный обсидиан и забайкальские тектиты – черные, непрозрачные, но образовались в различных обстановках.

Экспрессными геммологическими методами (методами рефрактометрии и гидростатического взвешивания) были выявлены плотности и показатели преломления стекол. Методом рентгеновской микротомографии была определена пористость объектов исследования (табл. 1). Вышеперечисленные методы являются неразрушающими и сохраняют вещество в исходном виде. Они могут использоваться для диагностики природных стекол, например, в ювелирных украшениях.

Таблица 1. Характеристики физических и оптических свойств исследуемых стекол различного генезиса.

Название стекла	Генетический тип	Цвет	Прозрачность	N	Плотность, г/см3	Общая пористость, %
Черный обсидиан	вулканический	черный	непрозрачный	1,48	2,36	1,18
Иризирующий обсидиан	вулканический	черный, темно-серый, серый	непрозрачный	1,49	2,37	0,2
Радужный обсидиан	вулканический	черный, темно-серый	непрозрачный	1,49	2,36	2,48
Обсидиан "Слезы Апачей"	вулканический	черный	прозрачный	1,47	2,34	0,5
Армянский обсидиан	вулканический	черный, бурый до коричневого, красного	полупрозрачный	1,49	2,37	0,5
Снежный обсидиан	вулканический	черный	непрозрачный	1,48	2,34	1,44
Макузанит	вулканический	светло-зеленый	прозрачный	1,48	2,37	2,16
Ливийское стекло	спорный генезис (вулканический/тектит)	от светло-зеленого до медово-желтого	прозрачный	1,49	2,24	0,09
Тектиты (Россия)	тектит	черный	непрозрачный	-	-	1,66
Влтавит	тектит	темно-зеленый	прозрачный	1,455-1,46	2,4	0,3
Индошинит	тектит	черный	непрозрачный	1,5	2,42	1,1
Иргизит	тектит	черный	непрозрачный	1,5	2,1	6,1
Жаманшинит (темный)	импактный	черный	непрозрачный	-	2,27	3,3
Жаманшинит (светлый)	импактный	грязно-желтый	непрозрачный	Слишком маленький образец		28,43
Тенгизит	техногенный	от глубокого синего до насыщенного зеленого	полупрозрачный	1,57	-	3,25

Между показателями преломления/плотностями и условиями образования стекол не наблюдается определенной корреляции, но возможно выявление некоторых особенностей.

Показатель преломления (N) у разных видов обсидианов схож: от 1,47 у обсидиана «Слезы Апачи» до 1,49 у армянских и иризирующих разновидностей. Данные вариации N вызваны незначительными колебаниями состава, в том числе кремнезема и щелочей (Природные стекла..., 1987) (рис. 34, 40). У тенгизита наблюдается недосыщенность кремнеземом (58,5-60,1 масс. %), что напрямую влияет на его повышенный, относительно остальных стекол, показатель преломления (1,57). Зависимость показателя преломления от содержания кремнезема в породе подтверждается предшествующими исследованиями (рис. 34). Преломление стекол зависит не только от их состава, но также от их структуры. Значительное влияние на структуру стекла оказывает скорость его охлаждения. Чем выше скорость охлаждения, тем меньше степень упорядочения стекла, следовательно, более низкий показатель преломления (Природные стекла..., 1987). Данный принцип реализуется в стеклах импактного генезиса: у индошинита, иргизита и влтавита. N индошинита и иргизита, а также ливийского стекла равен 1,49-1,5, что может указывать на высокую скорость застывания стекломассы, в отличие от влтавита, показатель которого характеризует медленное охлаждение.

Плотность и пористость – взаимозависимые друг от друга свойства, обратная зависимость наблюдается на примере иргизита. Он имеет самую маленькую плотность ( $2,1 \text{ г/см}^3$ ) из исследуемых образцов, при этом обладая высокой пористостью (6,1 %). Эта закономерность соблюдается и у остальных стекол. У ливийского стекла данной зависимости не наблюдается, имея низкую плотность ( $2,24 \text{ г/см}^3$ ), его самая низкая среди других стекол пористость (0,09 %) тоже низкая. Данная особенность объясняется высококремнистым составом стекла и, вероятно, условиями его образования. Возможно, ливийское стекло не подвергалось аэродинамическому воздействию, и теория атмосферного взрыва оказывается небезосновательной. Поэтому, плотность и пористость, также, как и показатель преломления, указывают на условия образования стекол. Чем выше пористость, тем образование стекла происходило быстрее, влияние флюида на породу было выше, и наоборот. Тектиты иргизит (рис. 35) и индошинит (рис. 36) и импактиты жаманшиниты (темный и светлый (рис. 37)) по значениям общей пористости не схожи с вулканическими стеклами (рис. 38), так как имеют повышенную пористость и более крупные размеры пустых каверн (табл. 2). У остальных тектитов (влтавита и

тектитов из России) данной зависимости не наблюдается, возможно, вследствие быстрого застывание породы.

У иргизита наблюдается линейная вытянутость каверн (рис. 35), которая доказывает аэродинамическое образование тектита, а именно его полет и вращение в атмосфере. Длинная ось эллипсоидальных полостей может указывать на направление движения незастывшего расплава. К краям образца наблюдается изменение формы пор с вытянутых на изометричные. Часть образца с изометричными сфероидальными (неизмененными) порами могла быть тыловой либо внутренней при аэродинамическом полете будущего иргизита. У индошинита подобных вытянутых каверн не наблюдается (рис. 36). В светлом жаманшините диагностирована очень высокая пористость, по сравнению с другими стеклами (28,43 %) (рис. 37). Данное наблюдение может говорить о том, что светлый жаманшинит не относится к так называемым «тагамитам», вероятно являясь импактной пемзой.

Среди вулканических стекол самая высокая пористость диагностирована у радужного обсидиана. Возможно, иризация, которой обладает данная разновидность стекла, объясняется не только упорядоченными включениями магнетита в массе, но и большим влиянием флюида на расплав, что свидетельствует о медленной его кристаллизации. У всех вулканических образований пористость колеблется в пределах 0,2-1,4 % (рис. 38).

Одной из главных отличительных особенностей темного жаманшинита является его плотностная неоднородность (рис. 39). На фотографии в массе стекла прослеживаются зоны повышенной (более светлые) и пониженной (более темные) плотностей. Отсутствие гомогенности в стекломассе объясняется высокой скоростью ее образования.

У тенгизита на микротомографических снимках наблюдаются изометричные крупные поры (размеры около 0,05-0,1 мм), которые равномерно распределены по объему стекла, а также многочисленные ксеногенные включения (рис. 40). Тенгизит был образован при пожаре, продолжавшемся значительное время (около 1 года). Данное событие подтверждает его медленное образование, при котором произошло обогащение стекла флюидами.

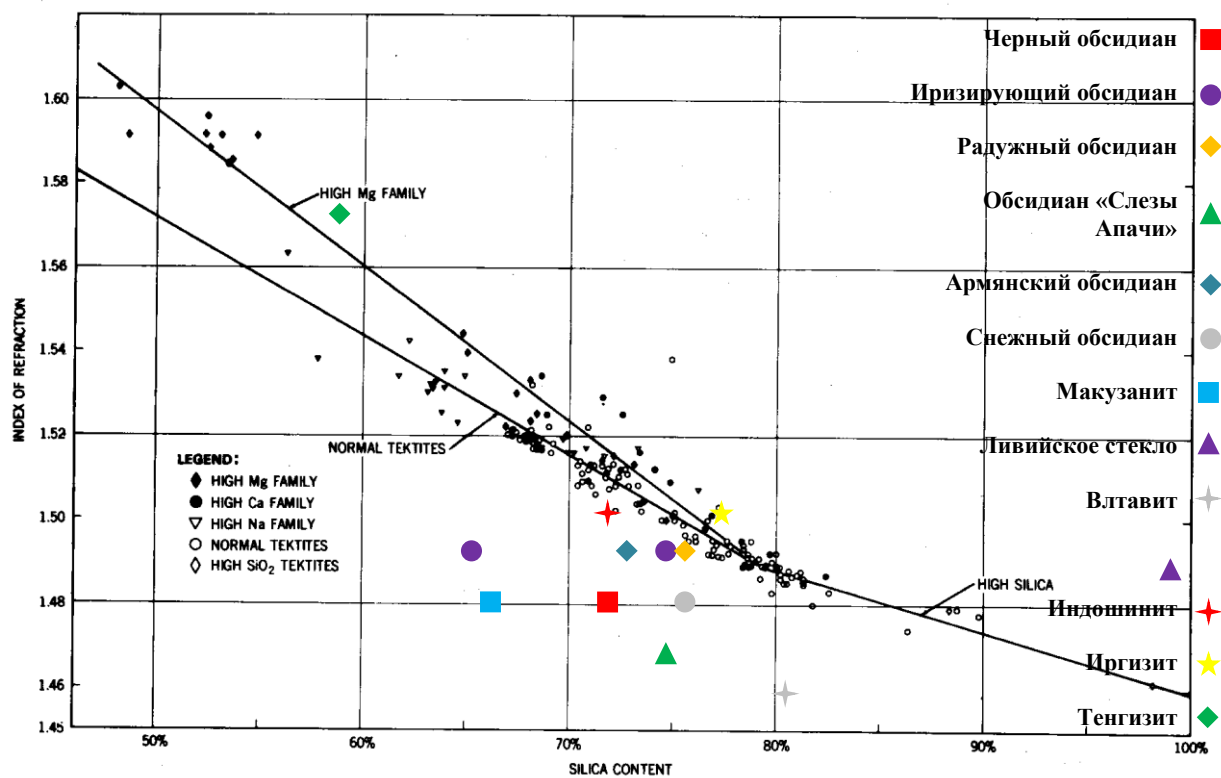


Рис. 34. Вариационная диаграмма «Показатель преломления – Содержание SiO<sub>2</sub> (масс. %)» (по O'Keefe, 1976).

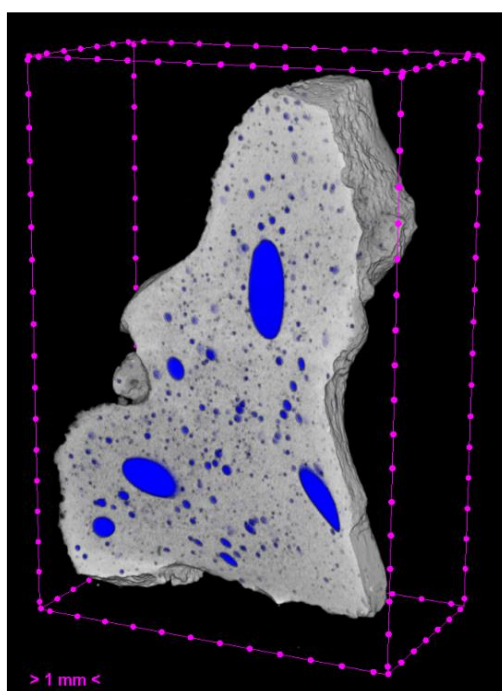


Рис. 35. Микротомографический снимок иргизита. Синим обозначены поры. Наблюдается линейная вытянутость каверн, которая доказывает аэродинамическое образование тектита.



Рис. 36. Индошинит, имеющий изометричные крупные каверны. Черный цвет – менее плотное вещество; белый цвет – более плотное вещество.

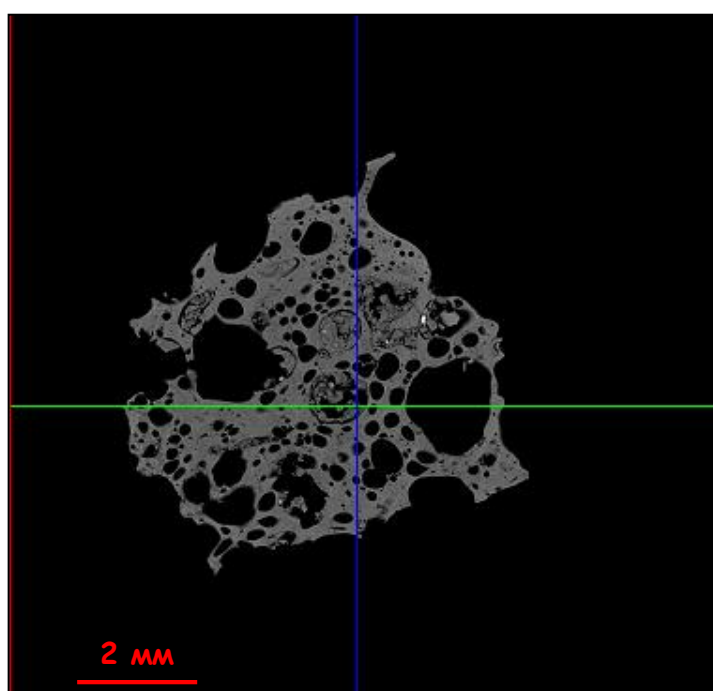


Рис. 37. Светлый жаманшинит, имеющий общую плотность, равную 28,43 %. Она является самой высокой среди изучаемых образцов.

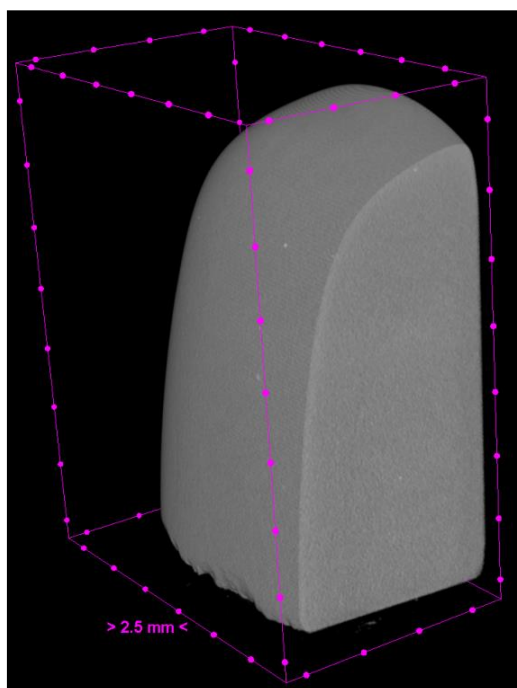


Рис. 38. Иризирующий обсидиан. Каверн не наблюдается, так как общая пористость является типичной для вулканических стекол и составляет всего 0,2 %.

Таблица 2. Характеристики пористости и размеров пор исследуемых стекол различного генезиса.

Название стекла	Генетический тип	Открытая пористость, %	Закрытая пористость, %	Размер пор (наиболее часто встречающийся), мм
Черный обсидиан	вулканический	0,04	1,08	0,01-0,04
Иризирующий обсидиан	вулканический	0,6	0,15	0,02-0,05
Радужный обсидиан	вулканический	0,08	2,4	0,02-0,06
Обсидиан "Слезы Апачей"	вулканический	0,04	0,49	0,01-0,04
Армянский обсидиан	вулканический	0,03	0,47	0,01-0,04
Снежный обсидиан	вулканический	0,03	1,41	0,01-0,04
Макузанит	вулканический	0,07	2,09	0,01-0,04
Ливийское стекло	спорный генезис (вулканический/тектит)	0,09	0,09	0,02-0,05
Тектиты (Россия)	тектит	0,07	1,59	0,02-0,06
Влтавит	тектит	0,2	0,06	0,02-0,05
Индошинит	тектит	0,01	1,09	0,02-0,05
Иргизит	тектит	0,01	6,08	0,09-0,11
Жаманшинит (темный)	импактный	0,39	2,94	0,02-0,05
Жаманшинит (светлый)	импактный	25,09	4,46	0,01-0,05
Тенгизит	техногенный	0,22	3,04	0,02-0,06
Съемка флюоресцентного стекла не удалась из-за слишком большой плотности образца.				

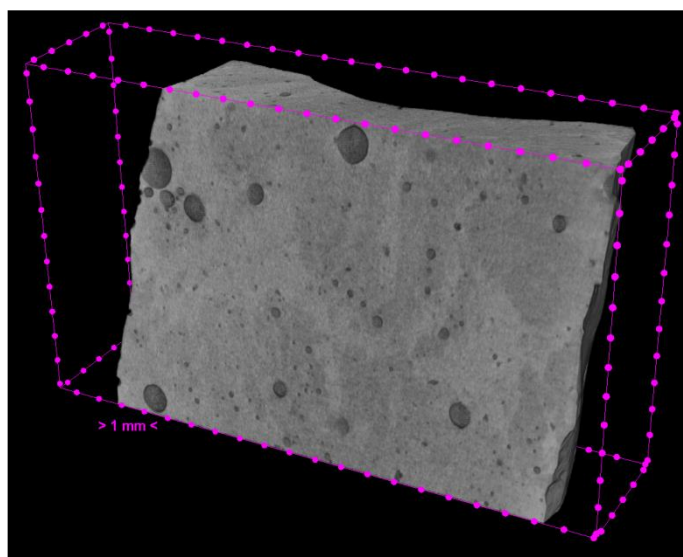


Рис. 39. Плотностная неоднородность в темном жаманшините.

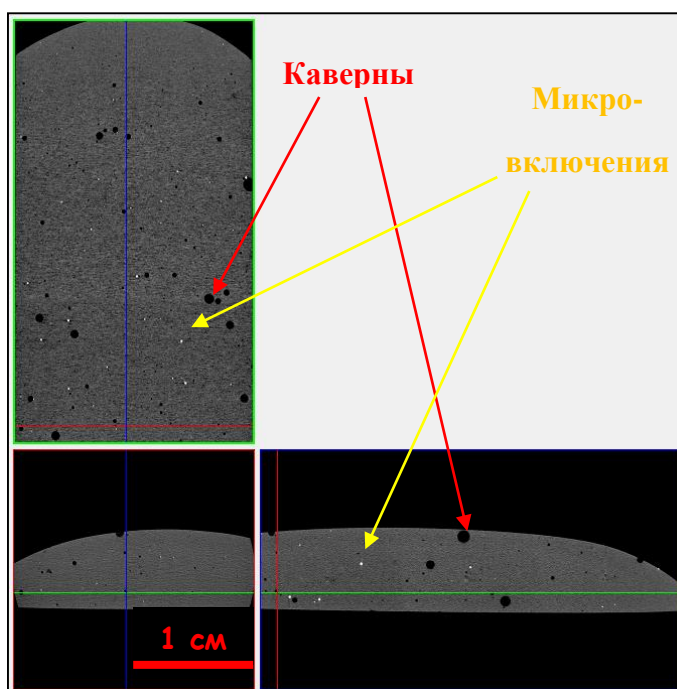


Рис. 40. Наблюдается равномерное распределение микровключений (отмечены белым цветом) и каверн (отмечены черным цветом) в образце техногенного стекла – тенгизита.

Таким образом, стекла различного генезиса различаются по своим физическим характеристикам, таким как показатель преломления, плотность и пористость. По показателю преломления выделяется группа обсидианов. Абсолютно все разновидности вулканических стекол имеют  $N = 1,47-1,49$ . У ливийского стекла  $N$  также равен 1,49. Тектит иргизит и импактит жаманшинит характеризуются отличным от вулканитов показателем преломления (1,5). Влтавит, являясь тектитом, имеет низкий показатель



преломления – 1,455-1,46. У тенгизита диагностирован самый высокий показатель, равный 1,57.

По плотности (2,34-2,37 г/см<sup>3</sup>) обсидианы выделяются в отдельную группу. Тектиты (влтавит и индошинит) (плотность = 2,4-2,42 г/см<sup>3</sup>) – в другую. Плотность ливийского стекла (2,24 г/см<sup>3</sup>) меньше, чем у вулканитов, но больше, чем у импактитов кратера Жаманшин (у иргизита – 2,1 г/см<sup>3</sup>; у жаманшинита – 2,27 г/см<sup>3</sup>).

Общая пористость вулканических стекол (от 0,2 до 2,48 % у радужного обсидиана), в целом, меньше, чем у стекол импактного генезиса (от 1,1 до 28,43 % у светлого жаманшинита) и тенгизита (3,25 %), исключениями являются влтавит (0,3 %) и ливийское стекло (0,09 %).

### 3.2. ПЕТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ

Содержание химических элементов в природных, техногенных и синтетических стеклах является одним из главных показателей условий их образования, а также важным отличительным признаком при их геммологической диагностике. Химический состав определялся методом электронно-зондового микроанализа (Приложение 1). По соотношению кремнезема и щелочей на классификационной ТАС-диаграмме (рис. 41) выделяются несколько обособленных областей. Область повышенных показателей щелочности (6-10 масс. %) образуют стекла вулканического происхождения; пониженных (1-5 масс. %) – тектиты. Тенгизит ( $\text{SiO}_2 = 58-60$  масс. %) и ливийское стекло ( $\text{SiO}_2 = 84-100$  масс. %), не содержащие калия и натрия, не принадлежат ни одной из двух групп. Образец «Обсидиана» имеет повышенные показатели щелочности (12-14 масс. %), что выделяет его в отдельную группу.

В области повышенных показателей щелочности, к которой относятся стекла вулканического генезиса, наблюдаются некоторые особенности составов. Область состава макузанита частично лежит в поле риолитов, частично трахитов. Данный факт говорит о не полной гомогенности массы стекла. Область состава иризирующего обсидиана также частично лежит в поле риолитов, частично трахитов и дацитов. Все остальные вулканические породы относятся к полю риолитов.

Точки состава «обсидиана», который характеризуется высокой щелочностью, выходят за границы области распространения вулканических пород, что может означать то, что данный образец не является природным образованием. Точки составов импактных стекол и ливийского стекла, в свою очередь, также выходят за границы вулканических образований, при этом стекла являются природными. Индошинит, в отличие от других тектитов и импактитов, которые лежат в поле риолитов, попадает в поле дацитов. Тенгизит находится в поле андезитов, но не является природным образованием. Полученные результаты согласовываются с предшествующими исследованиями (Heide et al., 2001).

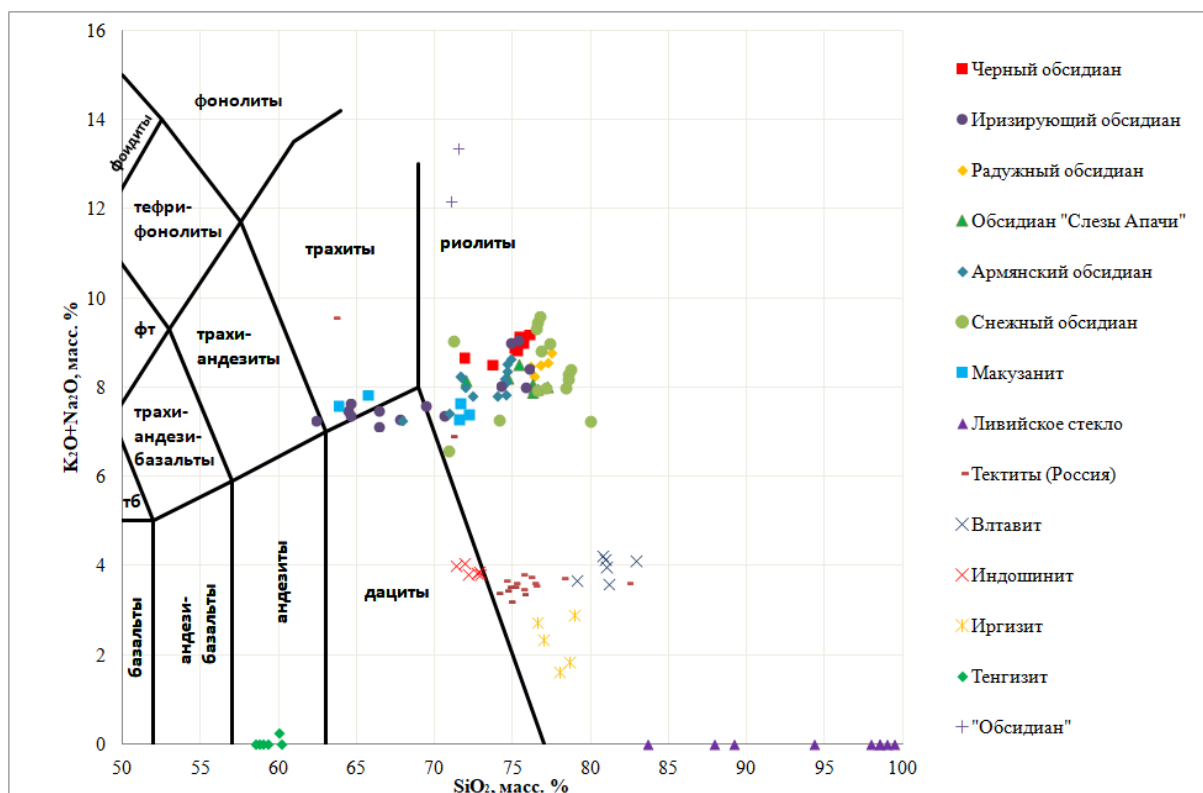


Рис. 41. Классификационная ТАС-диаграмма по (Le Maitre, 1989) для стекол различного генезиса.

Соотношение  $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (общ.) не показывает определенных трендов составов, но на диаграмме (рис. 42), все же, прослеживаются некоторые закономерности. Жаманшинит (рис. 43) и тектиты (за исключением, влтавита) образуют поле повышенного содержания железа по сравнению с магматическими образованиями. Армянский обсидиан имеет широкую область вариаций содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (общ.) из-за своей неомогенности. Обсидиан имеет зоны повышенного (3,7-10 масс. %) и пониженного (0-0,8 масс. %) содержания железа. Иризирующий обсидиан содержит от 1 до 3 % железа, имея пониженные содержания кремния. Тенгизит резко выделяется не только по отсутствию щелочей, но и по высокому содержанию  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (общ.), в отличие от ливийского стекла. Стекло практически не содержит железа, характеризуясь повышенным содержанием кремния.

По содержанию кальция стекла вулканического генезиса образуют зону пониженных концентраций (до 1 масс. %), а импактного генезиса – повышенных (около 2 масс. %) (рис. 44). Влтавит выбивается из группы тектитов, так как имеет содержание кальция около 4 масс. %. У тенгизита концентрация  $\text{CaO}$  составляет 14-16 масс. %. «Обсидиан» отличается от других стекол не только по содержанию щелочей, но также по содержанию кальция.

Содержание магния у вулканических стекол и тенгизита, в основном, не превышает 0,5 масс. % (рис. 45). Природные стекла импактного генезиса имеют содержания MgO от 1,5 до 2,5 масс. %. Иргизит и «Обсидиан» образуют третью область содержаний: от 2,5 до 3,6 масс. % MgO.

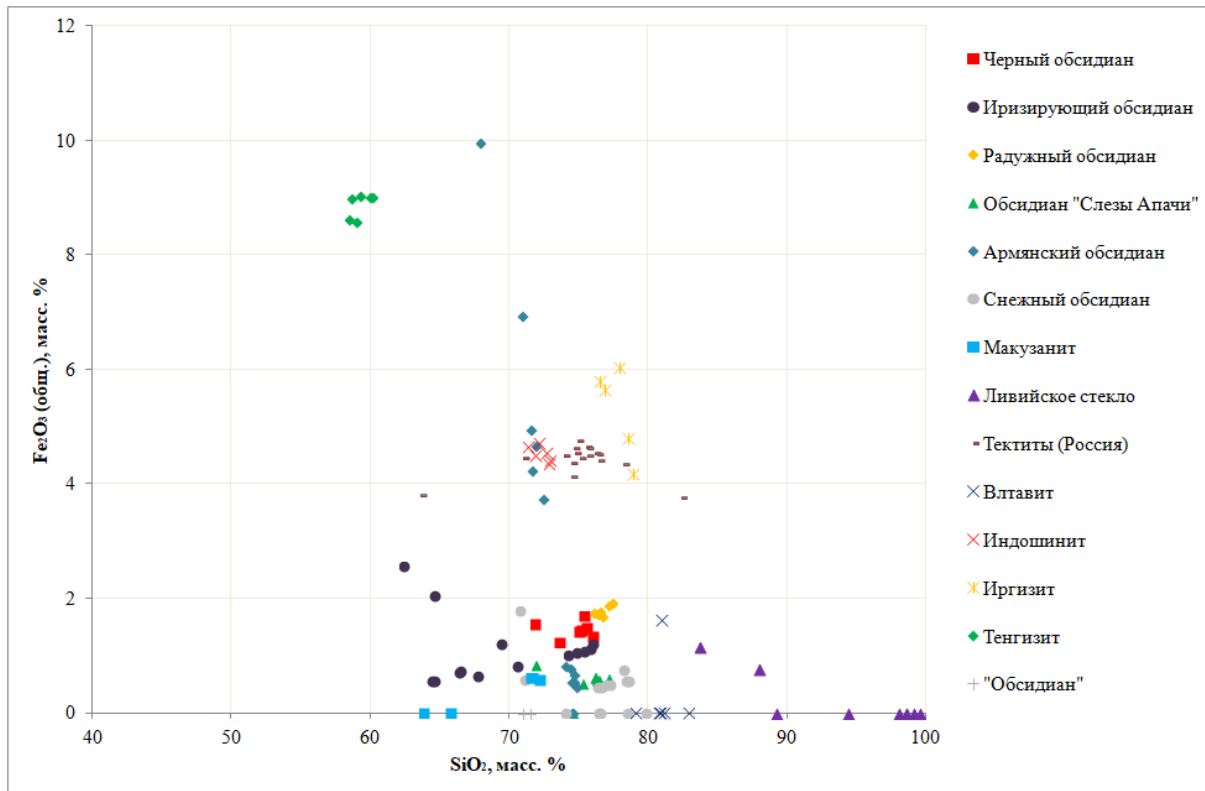


Рис. 42. Вариационная диаграмма  $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$  (общ.) (масс. %).

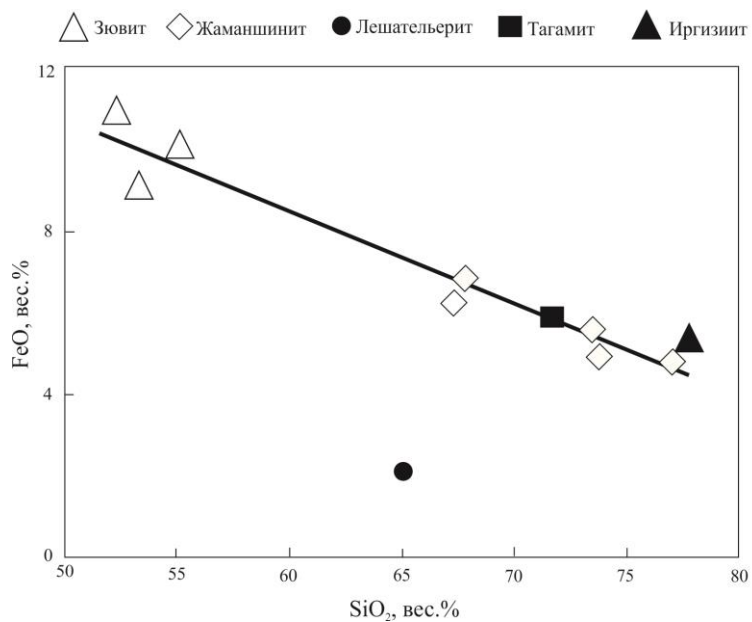


Рис. 43. Вариационная диаграмма  $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3$  (общ.) (масс. %) (Генин, Соловьева, 2020).

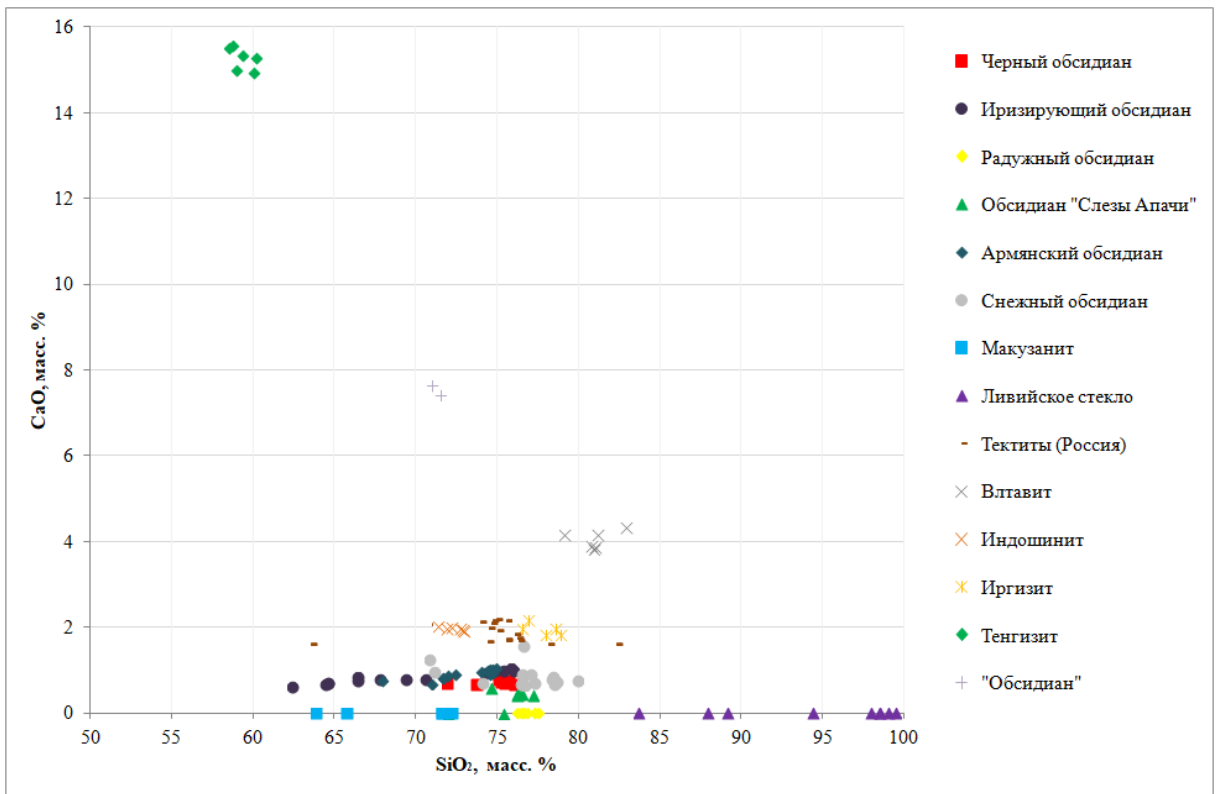


Рис. 44. Вариационная диаграмма SiO<sub>2</sub> – CaO (масс. %).

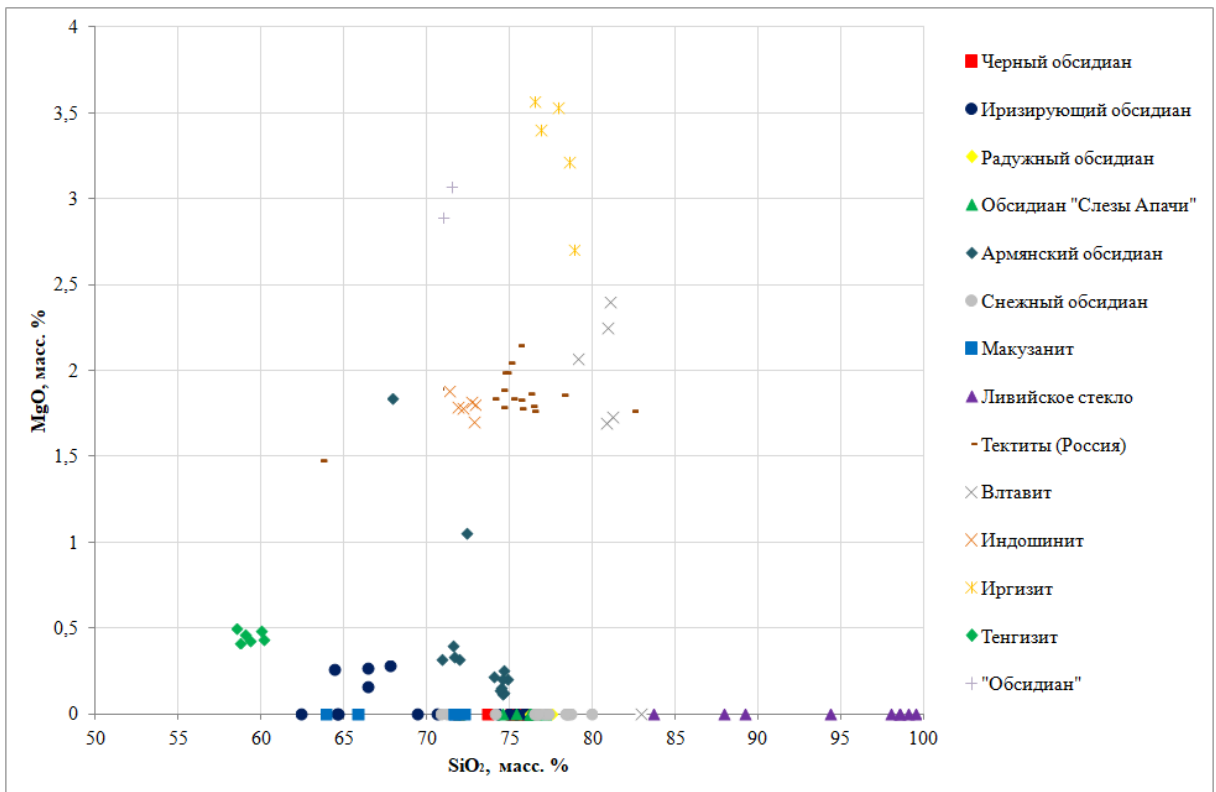


Рис. 45. Вариационная диаграмма SiO<sub>2</sub> – MgO (масс. %).

Таким образом, на основе обобщений химических составов, изученные образцы стекол различного генезиса можно разделить на три группы: 1 – ливийское стекло,

характеризующееся отсутствием щелочей, кальция, магния, низким содержанием железа (менее 1 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), самым высоким содержанием кремнезема (85-100 масс. %). 2 – тектиты (влтавит, тектиты (Россия), индошинит и иргизит), характеризующиеся низким содержанием щелочей (1,9-4,1 масс. %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), высоким содержанием железа (3,9-6 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), содержанием оксида кальция около 2 масс. % и значительным содержанием магния (1,7-3,6 масс. %  $\text{MgO}$ ). 3 – вулканические стекла (обсидианы и макузанит), характеризующиеся высоким содержанием щелочей (6-10 масс. %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), низким содержанием железа (0-2 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), содержанием оксида кальция 0-1 масс. % и незначительным содержанием магния (0-0,5 масс. %  $\text{MgO}$ ).

Тенгизит – техногенное стекло, отличается от природных образований отсутствием щелочей, высокими содержаниями железа (около 9 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и кальция (около 15 масс. %  $\text{CaO}$ ).

«Обсидиан», продаваемый, как новый вид природного стекла, характеризуется значительными содержаниями щелочей (12-14 масс. %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), кальция (около 8 масс. %  $\text{CaO}$ ) и магния (около 3 масс. %  $\text{MgO}$ ), что позволяет судить о его не природном происхождении.

### 3.3. МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В СТЕКЛАХ

Минеральные включения могут многое рассказать об условиях образования природных и техногенных стекол, кроме того они позволяют отличать их от многочисленных синтетических аналогов (табл. 3). Минеральные включения в стеклах были диагностированы методами электронно-зондового микроанализа (Приложение 2) и спектроскопии комбинационного рассеяния (Приложение 3).

Таблица 3. Минеральные включения в исследуемых стеклах различного генезиса.

Стекло	Минеральные включения				
	Настольный растровый электронный микроскоп-микроанализатор TM 3000 (НИТАСИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СПбГУ	Сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N, РЦ «Геомодель», СПбГУ	Экспресс-рамановский спектрометр SENTERRA, РЦ "Оптические и лазерные методы исследования вещества", СПбГУ	Рамановский спектрометр Horiba Jobin-Yvon LabRam HR800, РЦ "Геомодель", СПбГУ	Итог
Черный обсидиан	Aug, Mag	Aug, Mag, Ol	-	Aug, Mag, Fs	Aug, Mag, Ol*, Fs*
Иризирующий обсидиан	Ap, Mag	Ap, Aug, Mag, Pl (андезин/лабрадор)	-	Ap, Pl (лабрадор)	Ap, Pl, Aug*, Mag*
Радужный обсидиан	Aug, Mag	Ab, Aug, Mag, Pl	-	Ano	Ab*, Ano*, Aug*, Mag*
Обсидиан "Слезы Апачи"	Aug, Wo, Zrn	Aug, Zrn	-	Pl (олигоклаз)	Aug*, Pl* (олигоклаз), Wo*, Zrn*
Армянский обсидиан	Ap, Aug, Mag	Ap, Aug, Mag, Ol	-	Ap, Mag, Fs	Ap, Mag, Aug*, Ol*, Fs*
Снежный обсидиан	Aug, Mag	Aug, Mag, Ol	-	не обнаруж.	Aug*, Mag*, Ol*
Макузанит	-	And/Sil, Zrn, Mnz	And, Gem, Pl (олигоклаз), Or	And, Ano, Ce, Hlm (Fe), Mnz, Mo, Or, Pl (олигоклаз), Qtz, Sa, Sil, Zrn	And, Sil, Mnz, Zrn, Ano*, Ce*, Gem*, Hlm* (Fe), Mo*, Or*, Pl* (олигоклаз), Qtz*, Sa*
Ливийское стекло	Zrn/Bdy	Zrn	Ant, C, Crs	Crs, Zrn	Zrn, Ant*, Bdy*, C*, Crs*
Тектиты (Россия)	-	не обнаруж.	-	не обнаруж.	не обнаруж.
Влтавит	-	Ab	C, Crs, SiC	SiC	Ab*, C*, Crs*, SiC*
Индошинит	Chr, Mag	не обнаруж.	-	не обнаруж.	Chr*, Mag*
Иргизит	-	не обнаруж.	Gem	не обнаруж.	Gem*
Тенгизит	не обнаруж.	Fe, Fe+Cu	-	-	Fe*, Fe+Cu*
Жаманшинит	-	не обнаруж.	-	не обнаруж.	не обнаруж.
"Обсидиан"	-	не обнаруж.	-	не обнаруж.	не обнаруж.
Флюоресцентное "стекло"	-	не обнаруж.	-	не обнаруж.	не обнаруж.

\*включения определено одним из методов исследования; другие включения подтверждены двумя методами.

Прочерки обозначают то, что данным методом стекло не изучалось.

Ab – альбит, Aug – (ферро) авгит, Ano – анортоклаз, Ant – анатаз, And – андалузит, Ap – апатит, Bdy – бадделеит, C – модификация углерода, Ce – церианит, Chr – (магнезио) хромит, Crs – кристобалит, Fs – ферросилит, Gem – гематит, Hlm – феррохоломквистит, Mag – магнетит, Mnz – монацит, Mo – молибденит, Ol – оливин, Or – ортоклаз, Pl – плагиоклаз, Qtz – кварц, Sa – санидин, SiC – муассанит, Sil – силлиманит, Wo – волластонит, Zrn – циркон.

Некоторые характеристики (размеры и формы) минеральных включений в стеклах различного генезиса представлены в табл. 4.

Таблица 4. Характеристики (размеры и формы) минеральных включений в исследуемых образцах стекол различного генезиса.

Стекло			Стекло		
Минеральные включения	Размеры, мкм	Форма	Минеральные включения	Размеры	Форма
<b>Черный обсидиан</b>			<b>Макузанит</b>		
<i>авгит</i>	около 10	ксеноморфная	<i>андалузит</i>	от 20 мкм до 3 мм	призматическая
<i>магнетит</i>	около 15	ксеноморфная, округлая	<i>силлиманит</i>	15-20	призматическая
<i>оливин</i>	окт.15	ксеноморфная	<i>монацит</i>	10-20	призматическая, округлая
<i>ферросиллит</i>	около 15	ксеноморфная, округлая	<i>циркон</i>	15-60	призматическая, вытянутая, округлая
<b>Иризирующий обсидиан</b>			<i>анортоклаз</i>	около 40	призматическая
<i>апатит (монацит?)</i>	около 60	призматическая, вытянутая	<i>церианит</i>	около 20	призматическая
<i>андезин/лабрадор</i>	80-100	призматическая, вытянутая, игольчатая	<i>гематит</i>	около 50	ксеноморфная
<i>авгит</i>	50-60	призматическая	<i>ферро-холмквистит</i>	15-50	призматическая
<i>магнетит</i>	около 50	призматическая, округлая	<i>молибденит</i>	около 70	ксеноморфная
<b>Радужный обсидиан</b>			<i>ортоклаз</i>	40-50	призматическая
<i>альбит</i>	около 50	призматическая	<i>олигоклаз</i>	около 40	призматическая
<i>анортоклаз</i>	10-150	призматическая, удлиненная, игольчатая	<i>кварц (виргиллит?)</i>	50-55	округлая
<i>авгит</i>	50-60	призматическая	<i>санидин</i>	около 40	призматическая
<i>магнетит</i>	50-150	призматическая, округлая	<b>Ливийское стекло</b>		
<b>Обсидиан "Слезы Апачи"</b>			<i>циркон</i>	10-30	идиоморфная призматическая и разрушенная
<i>авгит</i>	15-20	призматическая, ксеноморфная	<i>анатаз</i>	около 20	призматическая
<i>олигоклаз</i>	около 15	призматическая	<i>бадделейт</i>	около 5	округлая, разрушенная
<i>воластонит</i>	около 10	ксеноморфная	<i>модификация углерода</i>	от 200 мкм до 1 мм	округлая
<i>монацит</i>	около 10	округлая	<i>кристобалит</i>	от 60 мкм до 1 мм	округлая
<b>Армянский обсидиан</b>			<b>Влтавит</b>		
<i>апатит</i>	около 25	призматическая	<i>альбит</i>	около 15	ксеноморфная
<i>магнетит</i>	25-40	призматическая	<i>модификация углерода</i>	около 10	округлая
<i>авгит</i>	30-40	призматическая, ксеноморфная	<i>кристобалит</i>	около 50	округлая
<i>оливин</i>	около 20	ксеноморфная	<i>муассанит</i>	10-20	округлая
<i>ферросиллит</i>	около 30	призматическая	<b>Индошинит</b>		
<b>Снежный обсидиан</b>			<i>магнезио-хромит</i>	15-20	ксеноморфная
<i>авгит</i>	около 35	призматическая	<i>магнетит</i>	15-20	ксеноморфная, округлая
<i>магнетит</i>	35-40	округлая	<b>Тенгизит</b>		
<i>оливин</i>	около 30	округлая, ксеноморфная	<i>сплав железа</i>	около 50	ксеноморфная
<b>Иргизит</b>			<i>сплав железа и меди</i>	около 50	ксеноморфная
<i>гематит</i>	около 50	ксеноморфная	<i>возможные углеводороды</i>	5-7	округлая, угловатая



Минеральные включения в *обсидианах* характерны для аналогичных вулканических пород. В *черном обсидиане* включения равномерно распределены в массе стекла (рис. 46). В основном, они имеют ксеноморфную и округлую формы и размеры 5-15 мкм.

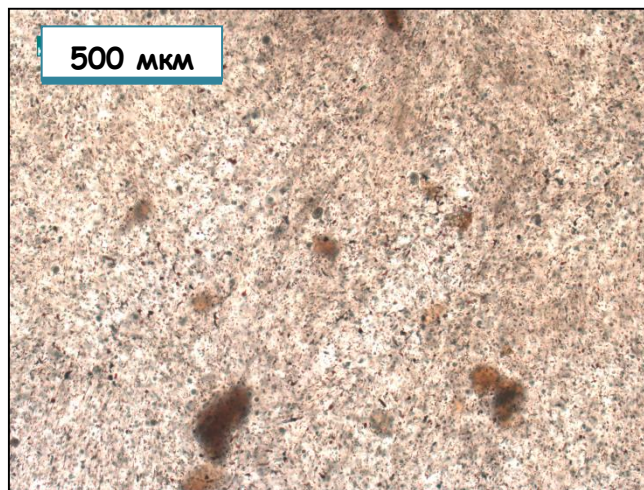


Рис. 46. Микрофотография включений в черном обсидиане. Включения равномерно распределены в массе стекла.

В черном обсидиане определены такие включения, как авгит, магнетит, оливин и ферросилит. Магнетит и авгит встречаются по отдельности, а также образуют сростки (рис. 47). Возможно, в данных сростках, магнетит является продуктом распада твердого раствора авгита.

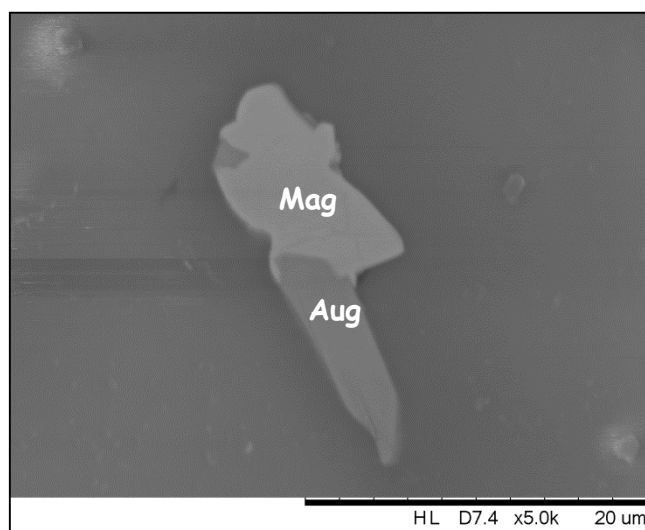


Рис. 47. Изображение включений в черном обсидиане (сростки магнетита и авгита) в обратно-рассеянных электронах.

В *призирующем обсидиане* определены апатит, плагиоклаз (лабрадор), авгит и магнетит. Они характеризуются идиоморфной формой и размерами от 50 до 100 мкм, они также равномерно распределены в стекломассе и имеют определенную направленность.

*Радужный обсидиан* характеризуется большим количеством вытянутых микровключений, не имеющих определенной направленности, длиной от 10 (игольчатая форма) до 150 мкм (призматическая форма) (рис. 48).

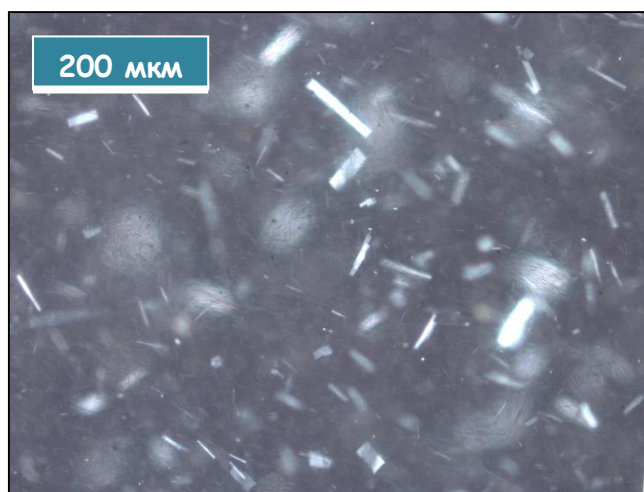


Рис. 48. Вытянутые разнонаправленные включения в радужном обсидиане (николи X).

В радужном обсидиане были определены альбит, анортоклаз, авгит и магнетит (отдельно и в сростках, аналогичных тем, которые были обнаружены в черном обсидиане).

В *обсидиане «Слезы Апачи»* идентифицированы аутигенные включения авгита, плагиоклаза (олигоклаза), волластонита и циркона, размеры которых не превышают 20 мкм. Особенностью химического состава циркона является наличие в нем 1,42 масс. % Hf.

В *армянском обсидиане* минеральные включения имеют разнообразные формы, в большинстве, призматические, их размеры колеблются в диапазоне 20-40 мкм. В обсидиане из Армении были идентифицированы сростания магнетита и авгита, аналогичные с мексиканскими образцами. Также были диагностированы апатит, оливин и ферросилит.

В *снежном обсидиане*, помимо кристобалита (размер до 2 мм) встречаются аутигенные авгит, магнетит и оливин размерами около 30-40 мкм.

*Макузанит* контрастно отличается от других вулканических стекол по составу минеральных включений, что характеризует специфические условия образования и помогает безошибочно его диагностировать. В составе макузанита были диагностированы

микровключения андалузита и силлиманита, а также, в небольшом количестве, кордиерит и ставролит (Cheilletz et al., 1992). Настоящее исследование показало присутствие более широкого набора минеральных включений в этом стекле. Они характеризуются неравномерным распределением, разнообразной, в основном, идиоморфной формой (призматические, игольчатые, шарообразные) и широкими вариациями размеров – от 15 мкм до 3 мм. Среди минеральных включений, кроме андалузита (рис. 49, 51, 53) и силлиманита, были диагностированы: санидин (рис. 51), ортоклаз, анортоклаз, плагиоклаз (олигоклаз), циркон (рис. 50, 51, 53), монацит (рис. 53), феррохломквистит, гематит, перианит, молибденит (рис. 51), кварц (рис. 52). Возможно, данный минерал не является кварцем, а является виргиллитом, который ранее уже был обнаружен в макузаните (French et al., 1978). Предположение о том, что данное включение является виргиллитом, было сделано на основании схожести формы кристаллов виргиллита с обнаруженным минералом, а также схожести их рамановских спектров. Некоторые включения андалузита, в свою очередь, также содержат минеральные включения, такие как циркон и монацит (рис. 53). Данный факт доказывается тем, что в рамановских спектрах циркона и монацита присутствуют пики минерала-«хозяина», то есть андалузита. Микровключения циркона и монацита в макузаните, а также во включениях андалузита нередко обнаруживаются в виде сростаний (рис. 51, 53).

Во всех включениях цирконов обнаружены примесные элементы, такие как Hf (около 1,6 масс. %) и U (около 1,8 масс. %). В монацитах также были обнаружены элементы-примеси: Y (около 2,6 масс. %), La (около 12 масс. %), Ce (около 23,7 масс. %), Nd (около 9,2 масс. %), Th (около 9,1 масс. %) и U (около 3,1 масс. %).

Аутигенными включениями являются санидин, ортоклаз, анортоклаз, олигоклаз, молибденит, кварц, монацит и циркон. Остальные, ксеногенные, вероятно, были захвачены из вмещающих метаморфических и метасоматических пород, что подтверждает вулканическое происхождение макузанита, с одной стороны и его уникальность – с другой.

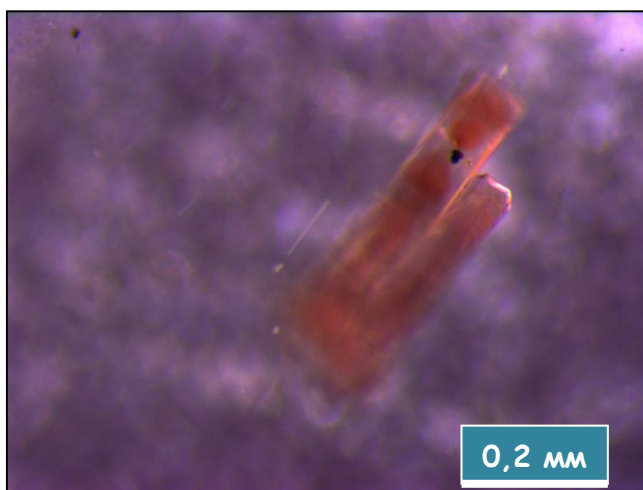


Рис. 49. Призматические включения розовато-оранжевых андалузита в макузаните.

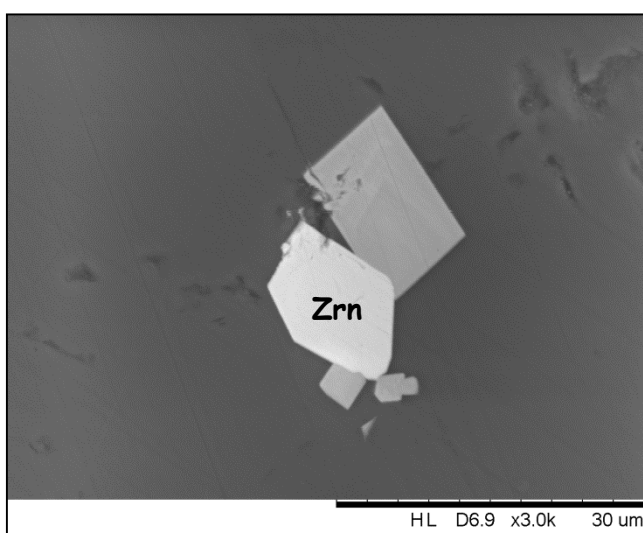


Рис. 50. Идиоморфные срастания циркона в макузаните.

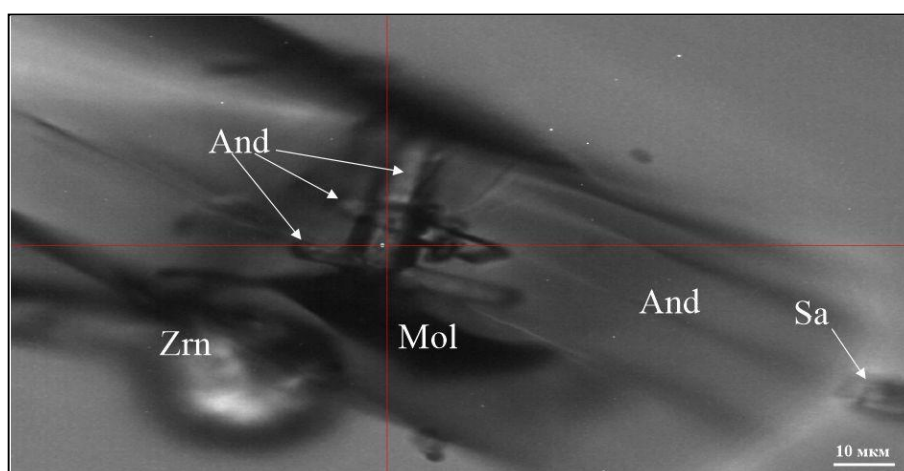


Рис. 51. Разнообразные минеральные включения в макузаните.

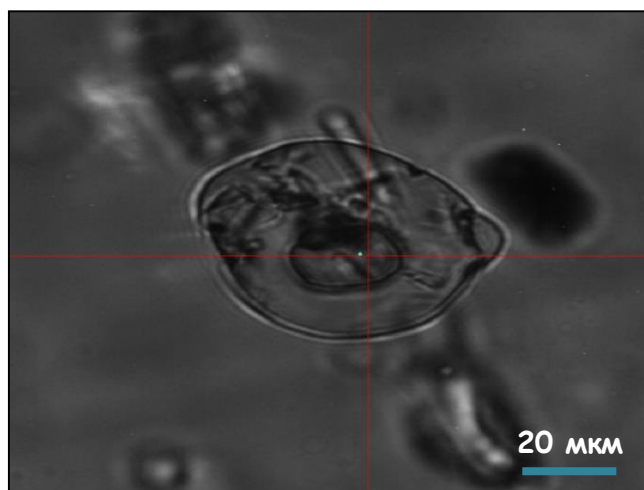


Рис. 52. Сфероидальное минеральное включение (возможно, кварц или виргиллит) в макузаните.

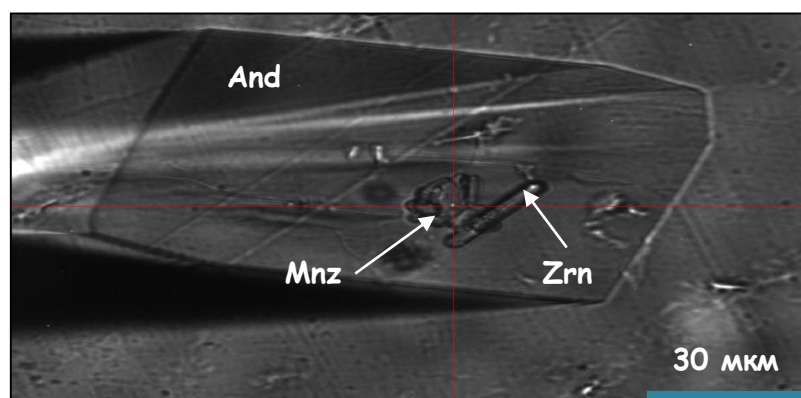


Рис. 53. Срастания монацита и циркона в макузаните.

Размер включений во *втавите* варьирует от 10 до 50 мкм. Форма их, в основном, шарообразная, либо округлая. Среди минеральных включений были диагностированы кристобалит, альбит (вероятно, ксеногенный) и муассанит (последний, возможно, мог быть привнесен в процессе изготовления пластинки для исследования). Особый интерес представляет округлое включение, размерами около 10 мкм. Отсутствие схожего спектра в базе данных RRUFF и рамановского спектрометра Horiba LabRam HR800 не позволило точно идентифицировать эту фазу (рис. 54). Самый интенсивный пик рамановского спектра данной фазы совпадает с аналогичным пиком спектра алмаза в области  $1300\text{ см}^{-1}$ , но также имеет и отличия – «плечо» в районе  $1500\text{ см}^{-1}$ , которое в спектре алмаза отсутствует, поэтому предполагается, что это одна из модификаций углерода. Возможно, «плечо» в районе  $1500\text{ см}^{-1}$  соответствует аналогичному пику графита, что говорит о том, что происходил полиморфный переход из графита в алмаз и лонсдейлит при импактном



метаморфизме (Nakamuta, Toh, 2013). Данный переход может происходить при давлении в 40-45 ГПа (Масайтис и др., 1995)

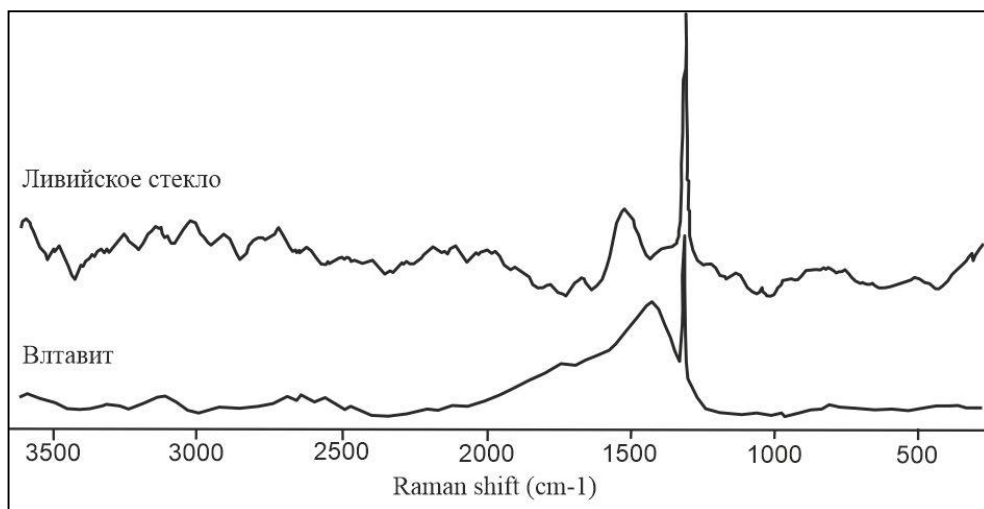


Рис. 54. Спектры включений углерода во влтавите и в ливийском стекле.

Минеральные микровключения в *ливийском стекле* по своим размерам (от 10 мкм до 1 мм), форме и составу сходны с таковыми во влтавите. Диагностированы: кристобалит (рис. 55), циркон и бадделеит (рис. 56), оксид титана (предположительно, анатаз), силлиманит и округлая фаза (размеры около 1 мм), рамановский спектр которой аналогичен модификация углерода (рис. 57), обнаруженной во влтавите (рис. 54). Наличие данной фазы в ливийском стекле является, предположительно, аргументом, позволяющим отнести его к стеклу, образованному импактным событием. Кристобалиты в ливийском стекле образуют вытянутые широкие зоны (рис. 55). В цирконах была обнаружена примесь гафния (около 1,6 масс. % Hf).

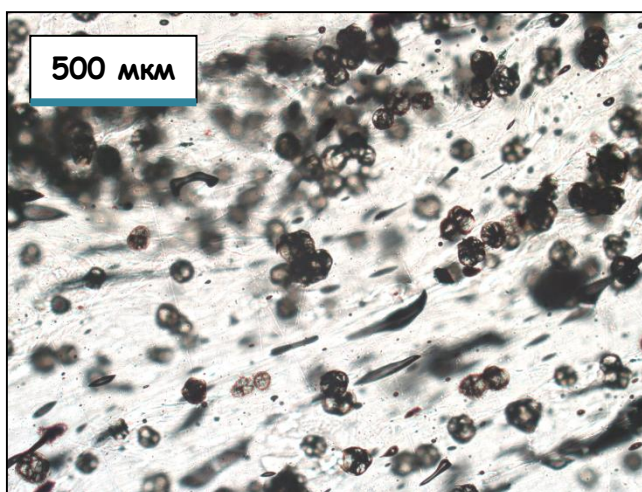


Рис. 55. Вытянутые зоны кристобалитов в ливийском стекле.

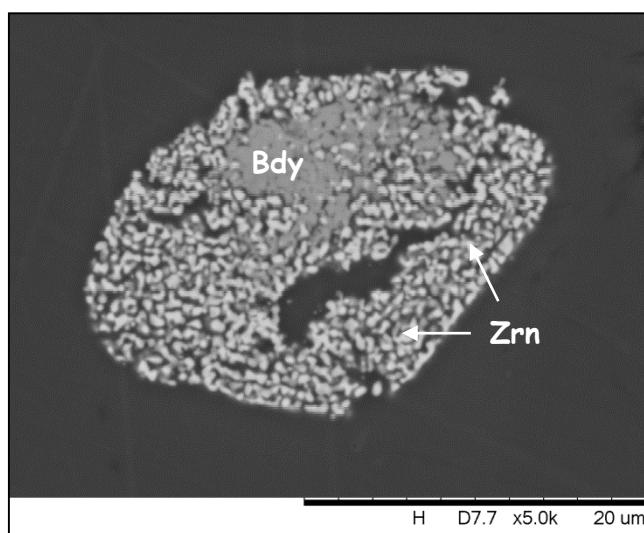


Рис. 56. Необласты циркона и бадделеит в ливийском стекле.

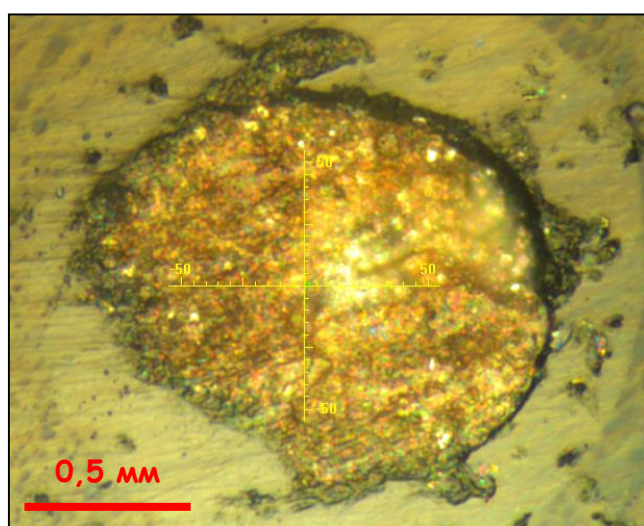


Рис. 57. Модификация углерода (возможно, представляет собой полиморфный переход из графита в алмаз и лонсдейлит) в ливийском стекле.

Интересными включениями, с точки зрения генезиса стекла, являются циркон и бадделеит (рис. 56). Циркон при ударном метаморфизме частично переходит в свою полиморфную модификацию – рейдит, после чего полностью диссоциирует в оксид циркония. Затем, уже бадделеит, частично или полностью прореагировав с кремнистым расплавом, образует новое поколение циркона (необласты циркона). Включения бадделеита сохраняются, потому что они изолируются новообразованными зернами циркона от дальнейших реакций с кремнистым расплавом (Cavosie, Koeberl, 2019). Данные превращения свидетельствуют о кратерообразующем событии, то есть об импакте. Таким образом, гипотеза образования ливийского стекла посредством взрыва небесного тела в воздухе, над поверхностью и последующем плавлении пород

оказывается неточной. Циркон в ливийском стекле встречается также в идиоморфной форме.

В *иргизите* обнаружены аутигенные включения гематита размером около 50 мкм. В *индошините* – включения магнезиохромита и магнетита (размеры 15-20 мкм), вероятно, ксеноморфные. Данные включения в тектитах – единичны.

Техногенное стекло *тенгизит* отличается по составу включений от всех остальных стекол, что является важным признаком при его геммологической диагностике. В нем были идентифицированы сплавы железа и меди (размерами около 50 мкм). Равномерно в массе стекла распределены включения необычной формы, состав которых не определяется методами электронно-зондового микроанализа и рамановской спектроскопии. Микровключения представляют собой черные угловатые образования (рис. 58), предположительно, углеводороды (размеры до 7 мкм). Методом конфокальной флуоресцентной микроскопии образец не изучался, в отличие от остальных образцов стекол. Данный метод показал отсутствие в них следов углеводородов.

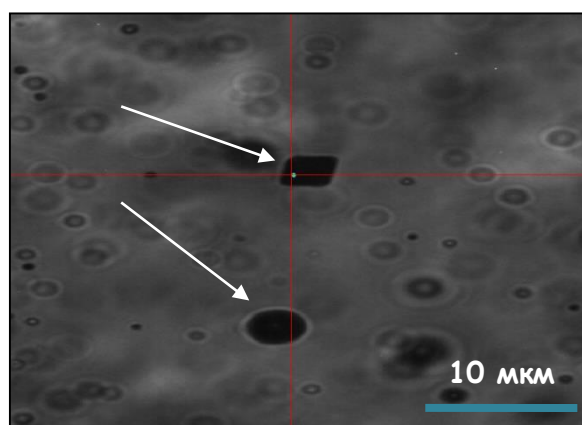


Рис. 58. Предположительно углеводородные включения необычной округлой формы в тенгизите.

В тектитах из России, жаманшините, «обсидиане» и флуоресцентном стекле минеральных включений *не обнаружено*.

Метод рентгенофазового анализа не выявил в образцах втавиты, ливийского стекла и индошинита количества минеральных фаз, достаточного для их диагностики данным методом, они оказываются ниже предела обнаружения анализа. Анализ проводился для установления/подтверждения модификаций углерода в тектитах.

Таким образом, в виде микровключений в двадцати образцах изучаемых стекол диагностировано двадцать восемь различных минеральных фаз, из них восемь



подтверждены несколькими аналитическими методами, двадцать – одним, из них два (муассанит во влтавите и анатаз в ливийском стекле) являются не достоверно диагностированными, они могли быть привнесены в процессе пробоподготовки.

Особый интерес представляет фаза, обнаруженная в ливийском стекле и аналогичная ей во влтавите. Предполагается, что данный минерал является модификацией углерода, возможно переходной фазой из графита в алмаз и лонсдейлит, что говорит о сходстве генезиса ливийского стекла и молдавита. Диагностированный в ливийском стекле бадделеит и неоциркон также представляют собой интерес. Они указывают на воздействие ударника на вмещающие породы, что означает то, что стекло, скорее всего, является тектитом с повышенным содержанием кремнезема.

Наиболее интересные минеральные включения обнаружены в макузаните. Данные микровключения впервые описаны в вулканическом стекле – санидин, церианит, феррохоломквистит, гематит и молибденит.

Включения сплавов железа и меди, а также интерметаллидов и, предположительно, углеводородов, в свою очередь, описаны в техногенном стекле также впервые. Данные включения могут указывать не только на образование тенгизита при пожаре на скважине, но и на очень специфические условия, при которых образовался расплав (на материалы, которые были расплавлены при образовании стекла; частицы материалов сейчас являются ксеногенными включениями). «Обсидиан» не имеет микровключений, что, скорее всего, является доказательством его синтетического происхождения.

### 3.4. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ

Спектроскопические свойства природных стекол, а именно спектры комбинационного рассеяния (КР), могут являться одним из признаков, позволяющих отличать их от синтетических (кристаллических) имитаций. Рамановская спектроскопия является неразрушающим методом анализа, поэтому она может использоваться для диагностики природных стекол в ювелирных украшениях. Кроме идентификации, с помощью рамановской спектроскопии возможно определять условия образования, а также степень кристалличности стекол. Условия образования последних отражаются на их анионной структуре. Большое влияние на структуру импактных и вулканических стекол оказывает время существования вещества в расплавленном состоянии. Одной из проблем, препятствующих исследованию анионной структуры стекол, является их неоднородность (особенно, у импактных образований), в частности участки с неполным плавлением первичной породы, а также вариации химического состава (Еремяшев, Рыбаков, 2006).

На примере образцов флюоресцентного «стекла» и макузанита можно наблюдать различие спектров КР. На спектре макузанита (рис. 59) наблюдается непрерывное аморфное гало, характеризующее отсутствие кристалличности в образце вулканического стекла. На спектре флюоресцентного стекла (рис. 60) выделяются пики в диапазоне вплоть до  $750\text{ см}^{-1}$ , это означает, что «стекло» имеет кристаллическую структуру, и не является природным аморфным образованием, являясь его имитацией.

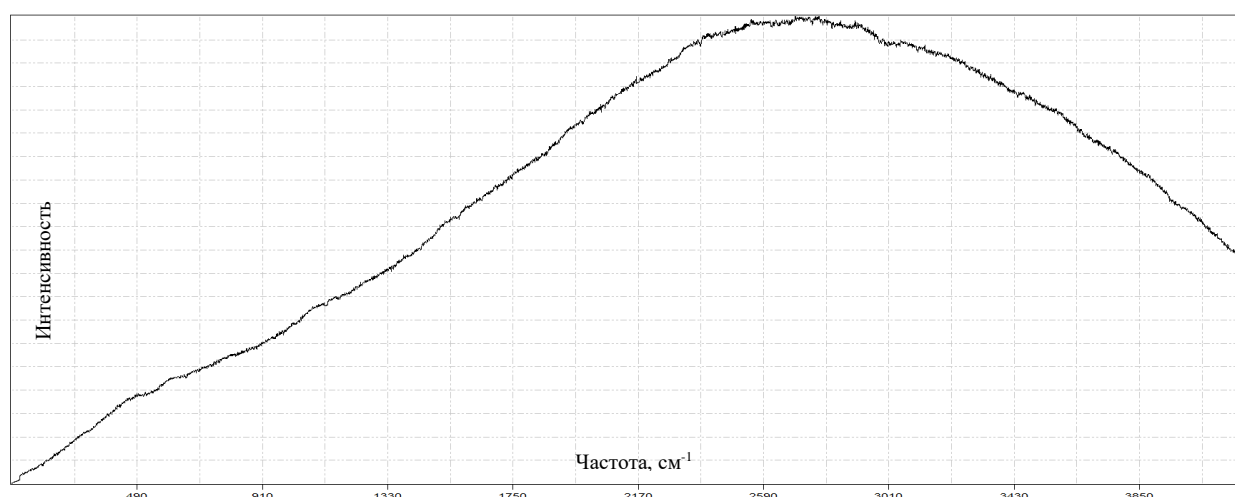


Рис. 59. Спектр КР макузанита.

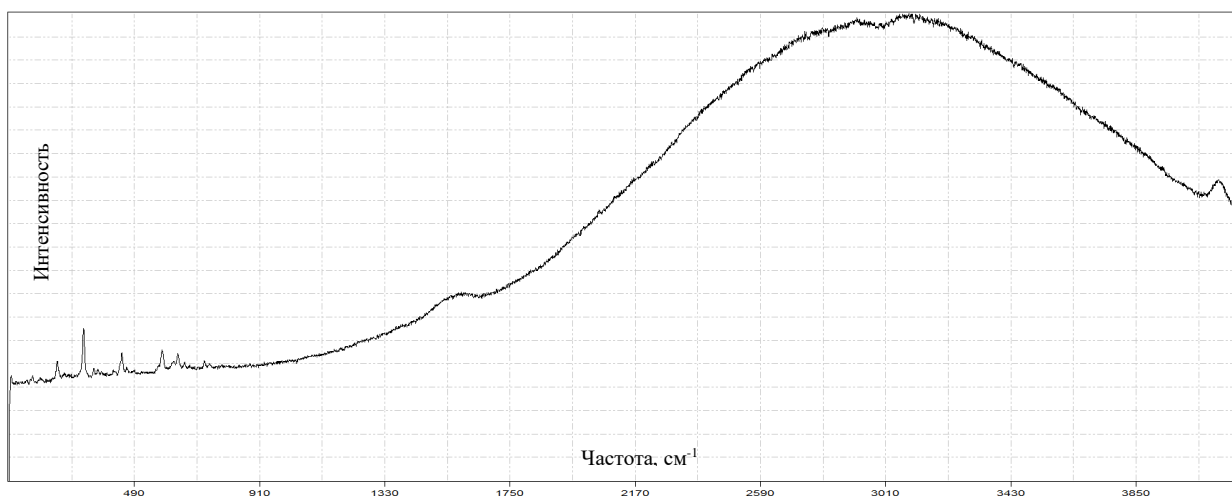


Рис. 60. Спектр КР флюоресцентного «стекла».

При сравнении спектров КР стекол вулканического генезиса (макузанит) и импактного (жаманшинит и тектиты (Россия)) также обнаружены различия. В отличие от непрерывного гало макузанита (рис. 59) (гало, в том числе, появляется из-за высокой флюоресценции стекла), у стекол импактного образования наблюдаются: у тектитов – широкие асимметричные полосы с максимумами около  $470\text{ см}^{-1}$  и  $1570\text{ см}^{-1}$  (рис. 61); у жаманшинита – асимметричная полоса с максимумом около  $470\text{ см}^{-1}$  и ярко выраженное плечо около  $870\text{-}1270\text{ см}^{-1}$  (рис. 62), которые подтверждаются предыдущими исследованиями (рис. 63, 64) (Еремяшев, Рыбаков, 2006).

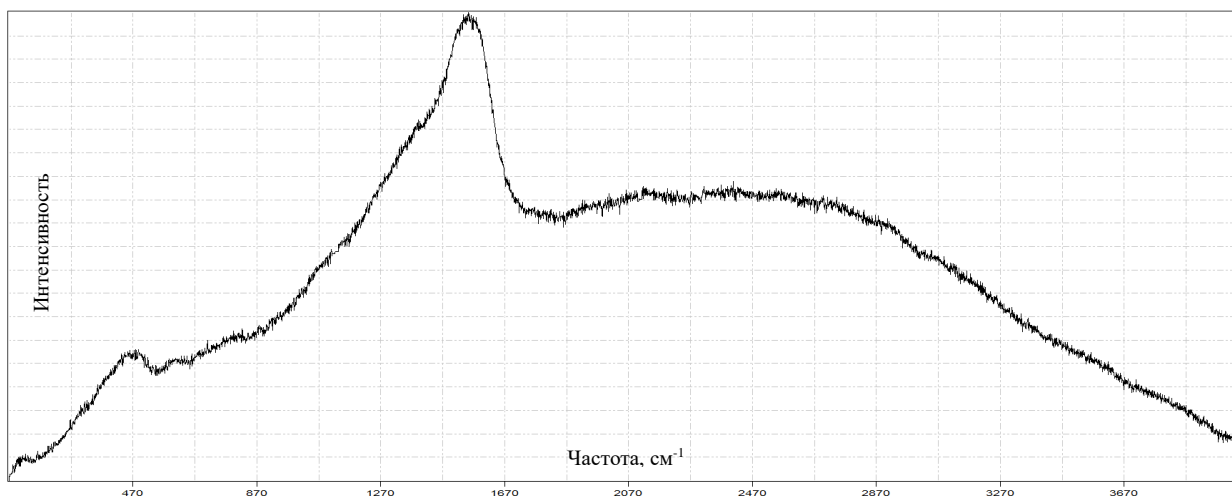


Рис. 61. Спектр КР тектитов (Россия).

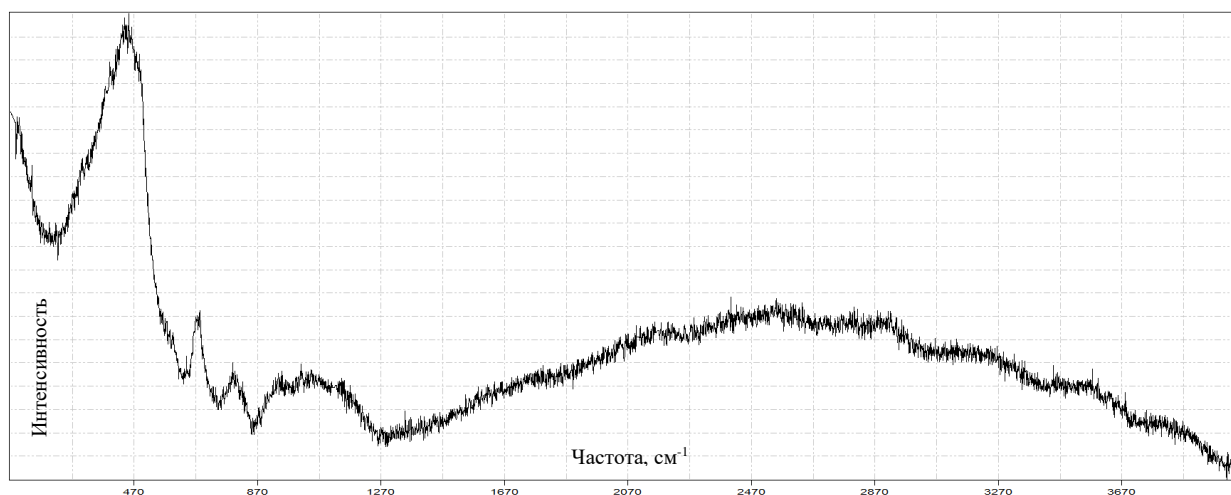


Рис. 62. Спектр КР жаманшинита.

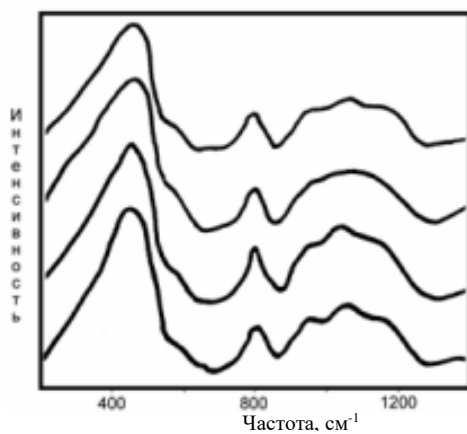


Рис. 63. Спектры КР светлых участков импактитов-жаманшинитов (Еремяшев, Рыбаков, 2006).

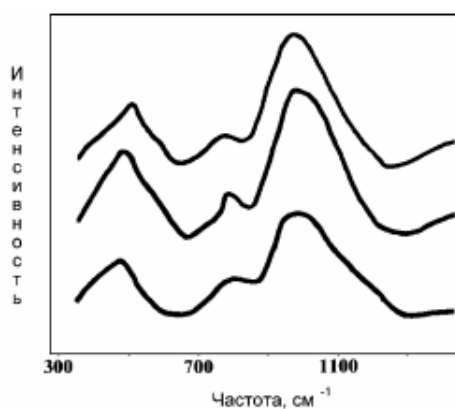


Рис. 64. Спектры КР тектитов-иргизитов (Еремяшев, Рыбаков, 2006).

Образец «обсидиана», купленный на минералогической выставке, имеет рамановский спектр, характерный для вулканических образований (рис. 65).

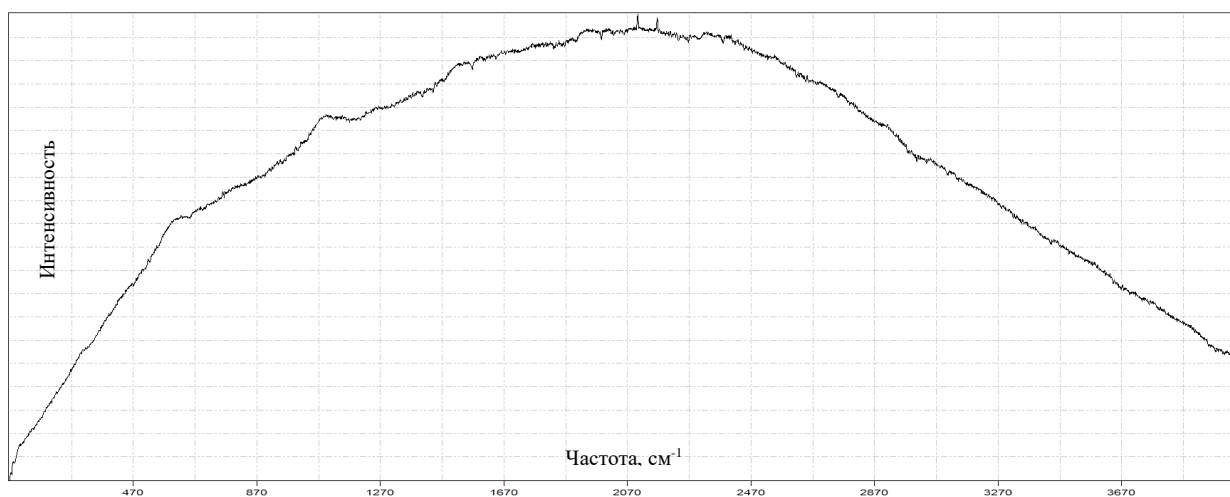


Рис. 65. Спектр КР «обсидиана».

Таким образом, рамановская спектроскопия может служить аналитическим методом не только для определения минеральных включений в природных стеклах, но также и для диагностики самой стеклообразной массы. Метод является неразрушающим, поэтому природное стекло в ювелирных украшениях, даже не имеющее микровключений, может быть диагностировано, что наблюдается на примере макузанита. Многочисленные имитации стекол, в особенности обсидианов, могут быть также определены, преимущественно, если они представляют собой кристаллические образования. Стекла, образовавшиеся в различных условиях, могут быть диагностированы с помощью характерных полос и максимумов рамановских спектров. У «обсидиана» наблюдается гало, характерное для вулканических образований, но по петрохимическим признакам данное стекло, скорее всего, является синтетическим. Исходя из этого, методом спектроскопии комбинационного рассеяния не всегда можно определить генезис стекла.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе, таким образом, рассматриваются два вопроса: определение условий образования природных стекол и их геммологическая диагностика. Основываясь на петрохимических, физических, оптических и спектроскопических свойствах стекол, а также на содержащихся в них микровключениях, были сделаны следующие выводы:

1) Образовавшиеся в различных обстановках стекла отличаются друг от друга оптическими и физическими свойствами, такими как показатель преломления, плотность и пористость. Данные аналитические методы могут использоваться в геммологических целях, так как не разрушают материал. Показатель преломления зависит от химического состава, структуры и, следовательно, от скорости застывания стекла. Плотность и пористость также зависят от скорости застывания и влияния флюида на породу.

По показателю преломления выделяется группа обсидианов (1,47-1,49). Близкие значения показателя преломления у ливийского стекла (1,49). Иргизит и жаманшинит характеризуются отличным от вулканических образований показателем преломления (1,5). Влтавит, являясь тектитом, имеет низкий показатель преломления (около 1,46). Тенгизит отличается самым высоким показателем преломления (1,57).

По плотности обсидианы выделяются в отдельную группу (2,34-2,37 г/см<sup>3</sup>). Тектиты (влтавит и индошинит) – в другую (2,4-2,42 г/см<sup>3</sup>). Плотность ливийского стекла (2,24 г/см<sup>3</sup>) меньше, чем у вулканических стекол, но больше, чем у импактитов кратера Жаманшин (2,1-2,27 г/см<sup>3</sup>).

Общая пористость вулканических стекол (0,2-2,48 %), в целом, меньше, чем у стекол импактного генезиса (1,1-28,43 %) и тенгизита (3,25 %), исключениями являются влтавит (0,3 %) и ливийское стекло (0,09 %).

2) Петрохимические свойства природных стекол могут различаться. Стекла вулканического и импактного генезиса образуют две группы по содержанию большинства петрогенных элементов. Ливийское стекло, тенгизит и «обсидиан» образуют отдельные от данных групп области.

Таким образом, на основе химических составов изученных образцов стекол различного генезиса, их можно разделить на три группы: 1 – ливийское стекло, характеризующееся отсутствием щелочей, кальция, магния, низким содержанием железа (менее 1 масс. % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), самым высоким содержанием кремнезема (85-100 масс. %); 2 –

тектиты (влавит, тектиты (Россия), индошинит и иргизит), характеризующиеся низким содержанием щелочей (1,9-4,1 масс. %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), высоким содержанием железа (3,9-6 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и значительным содержанием магния (1,7-3,6 масс. %  $\text{MgO}$ ); 3 – вулканические стекла (обсидианы и макузанит), характеризующиеся высоким содержанием щелочей (6-10 масс. %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), низким содержанием железа (0-2 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и незначительным содержанием магния (0-0,5 масс. %  $\text{MgO}$ ).

Тенгизит – техногенное стекло, отличается от природных образований отсутствием щелочей, значительными содержаниями железа (около 9 масс. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) и кальция (около 15 масс. %  $\text{CaO}$ ).

«Обсидиан», продаваемый, как новый вид природного стекла, характеризуется высоким содержанием щелочей (12-14 масс. %  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ), кальция (около 8 масс. %  $\text{CaO}$ ) и магния (около 3 масс. %  $\text{MgO}$ ), что позволяет судить о его не природном происхождении.

3) Присутствие или отсутствие минеральных включений в стеклах указывают на их генезис. Ассоциации минералов в природных стеклах являются индикаторами образования последних в характерной для них обстановке. Присутствие минеральных включений в стеклах позволяет отличать их от синтетических аналогов.

В двадцати образцах изучаемых стекол диагностировано двадцати восьми различных минеральных включений, из них восемь подтверждены несколькими аналитическими методами, двадцать – одним, из них два являются не достоверно диагностированными, они могли быть привнесены в процессе пробоподготовки.

Интересна фаза, обнаруженная в ливийском стекле во влавите. Данный минерал является модификацией углерода, возможно переходной фазой из графита в алмаз и лонсдейлит, что говорит о сходстве генезиса вышеупомянутых стекол. Диагностированный в ливийском стекле бадделеит и необласты циркона указывают на воздействие ударника на нубийские песчаники. Стекло, поэтому, вероятно, является тектитом.

В макузаните были впервые описаны минеральные включения: санидин, церианит, феррохолмквистит, гематит и молибденит. Включения сплавов железа и меди, интерметаллидов и, предположительно, углеводородов описаны в тенгизите также впервые. «Обсидиан» не имеет микровключений, что является доказательством его синтетического происхождения.

4) По спектроскопическим характеристикам стекол возможно производить геммологическую диагностику, а также предполагать скорость застывания образца, то есть геологическую обстановку, в которую оно сформировалось. Метод является

неразрушающим, поэтому природное стекло в ювелирных украшениях, даже не имеющее микровключений, может быть диагностировано. Многочисленные имитации стекол могут быть также определены. Стекла, образовавшиеся в различных условиях, могут быть диагностированы с помощью характерных полос и максимумов рамановских спектров.

Представленная выпускная квалификационная работа вносит дополнения и коррективы в имеющиеся знания о природных стеклах различного генезиса.

Таким образом, стекла различного генезиса отличаются по физическим, оптическим, петрохимическим и спектроскопическим свойствам и набору установленных в них микровключений. Минеральные включения в природных стеклах, с одной стороны, являются важными индикаторами условий их образования, а с другой – позволяют идентифицировать их в ювелирных изделиях.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богати́ков О. А., Борсу́к А. М. Природные стекла – индикаторы геологических процессов // М.: Наука, 1987, 155 с.
2. Воронцов Б. С. и др. Молекулярные модели для изучения влияния гидроксильных групп на структуру и свойства алюмосиликатных стекол и расплавов // Вестник Курганского государственного университета, Серия «Естественные науки», выпуск 3, 2010, С. 49-51.
3. Генин Д. А., Соловьева А. Д. Различие петрохимических свойств импактных пород в кратере Жаманшин // Сборник тезисов докладов всероссийской молодежной геологической конференции памяти В. А. Глебовицкого, СПб: Изд-во ВВМ, 2020, С. 27-30.
4. Горностаева Т. А. Микро- и нанонеоднородность земных и лунных импактных стекол // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук, 2016.
5. Еремяшев В. Е., Рыбаков В. Н. Особенности анионной структуры импактных стекол из кратера Жаманшин: результаты исследования методом локальной спектроскопии комбинационного рассеяния // «Вестник Отделения наук о Земле РАН», № 1 (24), 2006.
6. Изох Э. П. Импактный кратер Жаманшин и проблема тектитов // Геология и геофизика, № 4, 1991, С. 3-15.
7. Кирюхин Л. Г. и др. Загадка Жаманшина // Природа, № 3, 1969, С. 70-72.
8. Кузьмин Я. В. и др. Геология и археология обсидиана // Наука из первых рук, 40, 2011, С. 112-119.
9. Масайтис В. Л. Петрология и геология импактитов // В 81е.: Проблемы петрологии. М: Наука, 1976, С. 220-231.
10. Масайтис В. Л. Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов // Л: Недра, 1983, 159 С.
11. Масайтис В. Л. и др. Геология астроблем // Л: Недра, 1980, 231 С.
12. Масайтис В. Л. и др. Попигайский метеоритный кратер // М: Недра, 1975, 124 С.
13. Масайтис В. Л. и др. Апографитовые импактные алмазы из астроблем Рис и Попигай // Зап. Всерос. минерал. о-во, 124 (4), 1995, С. 12-19.
14. Мурдмаа И. О. и др. Новый морфологический тип глубоководных изменений базальтовой лавы // Докл. АН СССР, Т. 205, N 5, 1973, С. 1205-1208.

15. Потапов С. С. Шайтанит и другие техногенные стекловатые продукты как имитации ювелирного тенгизита // РАН, Уральское отделение, Минералогия техногенеза-2012, С. 76-94.
16. Потапов С. С. и др. Геологическая позиция, химический состав и спектроскопические особенности тенгизитов – индикаторов специфических высокотемпературных техногенных процессов // РАН, Уральское отделение, Минералогия техногенеза-2001, С. 77-87.
17. Скрипко и др. Новые поступления метеоритов и импактитов в коллекцию музея землеведения МГУ // Жизнь Земли, 39 (1), 2017, С. 39-46.
18. Фельдман В. И., Глазовская Л. И. Импактитогенез // М: «КДУ», «Университетская книга», 2018, 154 С.
19. Флоренский П. В. Метеоритный кратер Жаманшин (Северное Приаралье) и его тектиты и импактиты // Изв. АН СССР, Сер. геол., № 10, 1975, С. 73-86.
20. Флоренский П. В., Дабижа А. И. Метеоритный кратер Жаманшин // М: Наука, 1980, 128 С.
21. Фрих-Хар Д. И., Лучицкая А. И. Позднемезозойские вулканиты и связанные с ними гипабиссальные интрузивы Монголии // М.: Наука, 1978, 167 С.
22. Хрянина Л. П. Метеоритные кратеры на Земле // М: Недра, 1987, 112 С.
23. Artemieva N. et al. Numerical modeling of tektite origin in oblique impacts: Implication to Ries-Moldavites strewn field // Bull. Czech Geol. Surv., V. 77, N. 4., 2002, P. 303-311.
24. Barakat A. A. et al. Some new data on the distribution of Libyan Desert Glass (Great Sand Sea, Egypt) // Silica '96: Meeting on Libyan Desert Glass and Related Desert Events, 1997, P. 29-36.
25. Barnes et al. Macusanite occurrence, age, and composition, Macusani, Peru // Bull. Geol. Soc. Amer. 81, 1970, P. 1539-1546.
26. Bouska V. V. et al. Irghizites and zhamanshinites: Zhamanchin crater USSR // Meteoritics, V. 16, № 2, 1981, P. 171-184.
27. Brugge N. The non-impact origin of the Libyan Desert Glass (LDG) – an unique opaline glass of volcanic origin (hyalite group), 2006.
28. Boslough M. B. E., Crawford D. A. Low-altitude airbursts and the impact threat // International Journal of Impact Engineering, v. 35, 2008, P. 1441-1448.
29. Cavosie A. J., Koeberl C. Overestimation of threat from 100 Mt-class airbursts? High-pressure evidence from zircon in Libyan Desert Glass // Geology, 47 (7), 2019, P. 609-612.

30. Chao E. C. T., El Goresy A. Shock attenuation and the implantation of Fe-Cr-Ni veinlets in the compressed zone of the 1973 Ries research deep drill core // *Geologica Bavarica*, 75, Munchen, 1977, P. 289-304.
31. Cheilletz A. et al. Stratigraphy and geochronology of the Macusani ignimbrite field: chronometer of the mio-pliocene geodynamic evolution of the Andes of SE Peru // *Symposium International «Geodynamique Andine»*, Paris, 1990, P. 341-344.
32. Cheilletz A. et al. Volcano-stratigraphy and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Macusani ignimbrite field: monitor of the Miocene geodynamic evolution of the Andes of southeast Peru // *Tectonophysics. Andean geodynamics*, 205 (1), 1992, P. 307-327.
33. Clark A. H. et al. A comparative study of the metallogenic and geochronological relationships in the northern part of the Central Andean tin belt, SE Peru and NW Bolivia // *Proc. of Quadrennial I.A.G.O.D. Symposium 6<sup>th</sup>*, 1984, P. 269-279.
34. Clayton P. A., Spencer L. J. Silica glass from the Libyan Desert // *Mineral. Mag.*, 23, 1934, P. 8-34.
35. Craig N. et al. Macusani obsidian from southern Peru: A characterization of its elemental composition with a demonstration of its ancient use // *Journal of Archaeological Science*, 37 (3), 2010, P. 569-576.
36. Derek A. et al. A handaxe of Libyan Desert Glass // *Antiquity*, LVI, 1982, P. 88-92.
37. El Goresy A., Chao E. C. T. Identification and significance of armalcolite in the Ries glass // *Earth and Planetary Science Letters*, v. 30, N 2, 1976, P. 200-208.
38. Fleischer R.L., Price P.B. Fission track evidence for the simultaneous origin of tektites and other natural glasses // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, 1964, P. 755-756.
39. French B. M. et al. Virgilite: a new lithium aluminium silicate mineral from the Macusani glass // *Peru. Amer. Mineral.*, 63, 1978, P. 461-465.
40. French B. M. *Traces of catastrophe: A Handbook of shock-metamorphic effects in Terrestrial meteorite impact structures* // LPI Contribution N 954, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1998, 120 P.
41. Frohlich F. et al. Libyan Desert Glass: New field and Fourier transform infrared data // *Meteoritics & Planetary Science*, v. 48, 2013, P. 2517-2530.
42. Gentner W. et al. New fission track ages of tektites and related glasses // *Geochem. et Cosmochem. Acta*, XXXIII, 1969.
43. Gimeno D. Devitrification of natural rhyolitic obsidian glasses: petrographic and microstructural study (SEM+EDS) of recent (Lipari island) and ancient (Sarrabus, SE Sardinia) samples // *Journal of Non-Crystalline Solids*, 323, 2003, P. 84-90.

44. Glass B. P. et al. Microirghizites recovered from a sediment sample from the Zhamanchin impact structure // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, V. 88, Supp. 1, 1983, P. 319-330.
45. Glazovskaya L.I., Golubkov V.V. Tektites and impact glasses of the Zhamanshin crater – 84eculiari 84eculiarities in connection with genesis problems // *Gemie der Erde Geochemistry*, V. 56, 1996, P. 477-480.
46. Gornostaeva T. A. et al. Impactor Type and Model of the Origin of the Zhamanshin Astrobleme, Kazakhstan // *Petrology*, 26 (1), 2018, P. 82-95.
47. Grebennikov A. V. et al. Obsidian provenance studies on Kamchatka Peninsula (Far Eastern Russia): 2003-9 results // *Crossing the Straits: Prehistoric Obsidian Source Exploitation in the North Pacific Rim*. Oxford: Archaeopress, 2010, P. 89-120.
48. Heide K. et al. Glass chemistry of tektites // *Planetary and Space Science*, 49 (8), 2001, P. 839-844.
49. Hyrsl J., Zäcek V. Obsidian from Chile with unusual inclusions // *Gemm.*, 26, 5, 1998, P. 321-323.
50. Kleinmann B. The breakdown of zircon observed in the Libyan Desert Glass as evidence of its impact origin // *Earth and Planetary Science Letters*, v. 5, 1968, P. 497-501.
51. Kleinmann B. et al. Evidence for shock metamorphism in sandstones from the Libyan Desert Glass strewn field // *Meteoritics & Planetary Science*, 36 (9), 2001, P. 1277-1282.
52. Klitzsch E. et al. Geological Map of Egypt 1:500 000 // Blatt NG 35 SW, Wadi El-Qubba, Cairo, Egypt, 1987.
53. Koeberl C. Libyan Desert Glass: Geochemical composition and origin // *Proceedings of the Silica '96 Meeting on Libyan Desert Glass and Related Desert Events*, 1997, P. 121-131.
54. Kokh S. et al. Numerical simulation of an oil-gas fire: A case study of a technological accident at Tengiz oilfield, Kazakhstan (June 1985-July 1986) // *Energy Exploration & Exploitation*, Vol. 34 (1), 2016, P. 77-98.
55. Kontak D. J. et al. The magmatic evolution of the Cordillera Oriental of SE Peru: crustal versus mantle components // *In Andean Magmatism: Chemical and Isotopic Constraints*, Shiva, 1984, P. 203-219.
56. Le Maitre R.W. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms* // Blackwell, Oxford, 1989.
57. London D. et al. Melt-vapor solubilities and elemental partitioning in peraluminous granite-pegmatite systems – experimental results with Macusani glass at 200 Mpa // *Contrib. Mineral Petrol*, Vol. 99, Iss. 3, 1988, P. 360-373.
58. Martin R. Wz. Are the «Americanites» tektites? // 1934, P. 123-132.

59. Mrazova S., Gadas P. Obsidian balls (marekanite) from Cerro Tijeerina, central Nicaragua: petrographic investigations // *Journal of Geosciences*, 56, 2011, P. 43-49.
60. Nadin E. The secret lives of minerals // *Engineering & Science*, No. 1, P. 10-20, 2007.
61. Nakamuta Y., Toh S. Transformation of graphite to lonsdaleite and diamond in the Goalpara ureilite directly observed by TEM // *American Mineralogist*, 98 (4), 2013, P. 574-581.
62. McCall G. J. H. The history of tektites // *Geological Society, London, Special Publications*, 256 (1), 2006, 471-493.
63. Mizera J. et al. Geochemical characterization of impact glasses from the Zhamanshin crater by various modes of activation analysis. Remarks on genesis of irghizites // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, V. 293, № 1, 2012, P. 359-376.
64. Noble D. C. Rare-element enriched, S-type ash-flow tuffs containing phenocrysts of muscovite, andalusite and sillimanite, southeastern Peru // *Geology*, 12, 1984, P. 35-39.
65. Osorio A.M. et al. Fission-track dating of Macusanite glasses with plateau and size correction methods // *Radiation Measurements*, 36, 2003, P. 407-412.
66. Papike J. J. et al. The Lodran primitive achondrite: Petrogenetic insights from electron and ion microprobe analysis of olivine and orthopyroxene // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V. 59, № 14, 1995, P. 3061-3070.
67. Pichavant M. et al. The Macusani glasses (NE Peru): evidence for chemical fractionation in peraluminous magmas // In Mysen B. O. (Ed.). *Magmatic processes: 549 geochemical principles* (Geochem Soc. special pub.), Geochem. Soc., Penn. State Univ., 1987, P. 359-373.
68. Pohl J. et al. The Ries impact crater // *Impact and explosion cratering*, Pergamon Press., 1977, P. 343-405.
69. Poupeau G. et al. Fission-track and K-Ar ages of «macusanite» obsidian glasses, (SE Peru): geodynamic implications // *Tectonophysics*, 205, 1992, P. 295-305.
70. Poupeau G. et al. Fission-track dating of 15 macusanite glass pebbles from the Macusani volcanic field (SE Peru) // *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21 (4), 1993a, P. 499-506.
71. Poupeau G. et al. Fission track dating of 18 macusanite glass pebbles // *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation, Part D, Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 21, 1993b, P. 583.
72. Reiff W. The Steinheim Basin-an impact structure // *Impact and explosion cratering*, Pergamon Press, 1977, P. 309-321.
73. Shackley M. S. *Obsidian. Geology and Archaeology in the North American Southwest* // The University of Arizona Press, Tucson, 2005, 243 P.

74. Short N. M. Shock metamorphism of natural materials // Mono Book Co., Baltimore, Md., 1968, 644 P.
75. Spencer L. J. Tektites and silica-glass // Mineral. Mag., 25: 167, 1939.
76. Stahle V., Ottemann J. Ries-Forschungsbohrung
77. Stebbins J. F. Glass structure, melt structure, and dynamics: Some concepts for petrology // American Mineralogist, 101(4), 2016, P. 753-768.
78. Storzer D., Wagner A. Fission track ages of North American tektites // Earth Planet. Sci. Lett., 10, 1971.
79. Taylor S. R., McLennan S. M. Chemical relationships among irghizites, zhamanshinites, Australasian tektites and Henbury impact glasses // Geochimica et Cosmochimica Acta, V. 43, № 9, 1979, P. 1551-1565.
80. Vetvicka I. et al. Electron microprobe analysis (WDS EPMA) of Zhamanshin glass reveals the impactor and a common role of accretion in the origin of splash-form impact glass // 11-th European Workshop on Modern Developments and Applications in Microbeam Analysis, IOP Conf Ser: Materials Science and Engineering, 7 (1): 012029, 2010.
81. Wasson J. T. Large aerial bursts: An important class of terrestrial accretionary events // Astrobiology, v. 3, 2003, P. 163-179.
82. Preuss E. Einführung in die Ries-Forschung // Geologica Bavarica, 61, Munchen, 1969, P. 12-24.
83. Stahle V., Ottemann J. Ries-Forschungsbohrung 1973: Zeolitisierung der Glaser im Suevit und Petrographie der Beckensuevite und Gangbreccien // Geologica Bavarica, Munchen, 75, 1977, P. 191-217.
84. Werner E. Das Ries in der schwabisch-frankischen Alb [The Ries in the Swabian-Franconian Alb] // Blatter der Schwab. Albvereins, v. 16, P. 153-167.
85. Arroyo G. Distrito uranifero de Macusani // VI Congreso Peruano de Geologia, Lima, 1987.
86. Valencia Herrera J. et al. Le volcanisme ignimbristique peralumineux plio-quadernaire de la region de Macusani, Perou // Acad. Sci., Paris, C.R. 298, 1984, 77-82.
87. Brugge N. The non-impact origin of the Libyan Desert Glass (LDG) – an unique opaline glass of volcanic origin (hyalite group), 2006 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.b14643.de/>.
88. O'Keefe J. A. Tektites and Their Origin, 1976 [Электронный ресурс] // URL: <http://www.originoftektites.com/>.
89. Географический факультет Брестского государственного университета имени А. С. Пушкина [Электронный ресурс] // URL: <http://www.brsu.by/div/geograficheskij-fakultet>.

90. Сайт открытой геологической информации [Электронный ресурс] // URL: <http://geo.web.ru/>.
91. Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН) [Электронный ресурс] // URL: <http://www.igem.ru/>.
92. Крупнейшая в мире открытая база минералов, горных пород, метеоритов и их месторождений [Электронный ресурс] // URL: <https://www.mindat.org/>.
93. База данных спектров комбинационного рассеяния, рентгеновского излучения и химических составов минералов (RRUFF) [Электронный ресурс] // URL: <https://rruff.info/>.
94. Сайт научно-точной информации о тектитах [Электронный ресурс] // URL: <https://www.tektites.info/>.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СТЕКОЛ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА

Таблица 5. Химический состав аморфной массы черного обсидиана. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

Черный обсидиан							
Номера точек	Содержание, масс. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	75,45	13,11	1,61	0,74	3,51	5,57	100,00
2	75,52	12,94	1,68	0,72	3,73	5,40	100,00
3	75,79	12,95	1,47	0,77	3,57	5,44	100,00
4	75,82	13,05	1,33	0,67	3,65	5,49	100,00
5	75,62	13,26	1,41	0,79	3,56	5,37	100,00
6	75,74	13,20	1,45	0,73	3,50	5,38	100,00
7	75,92	13,36	1,26	0,70	3,41	5,35	100,00

Таблица 6. Химический состав аморфной массы иризирующих обсидианов. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

Иризирующий обсидиан								
Номера точек	Содержание, масс. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	75,16	14,38	0,64	0,30	0,78	5,33	3,39	100,00
2	75,34	14,25	1,31	0,00	0,87	4,44	3,79	100,00
3	76,36	13,95	0,88	0,00	0,85	4,17	3,79	100,00
4	75,75	14,20	0,72	0,31	0,88	4,61	3,53	100,00
5	76,00	13,90	0,83	0,18	0,95	4,44	3,69	100,00
6	75,49	14,06	0,81	0,31	0,85	4,88	3,60	100,00
7	74,14	13,94	2,37	0,00	0,80	5,22	3,52	100,00
8	73,80	13,88	3,03	0,00	0,71	5,06	3,52	100,00
9	75,97	13,92	0,65	0,00	0,81	5,08	3,57	100,00
10	75,51	13,94	1,19	0,00	1,00	3,78	4,58	100,00
11	75,76	14,06	1,03	0,00	0,95	3,87	4,33	100,00
12	75,80	14,03	1,12	0,00	1,04	3,71	4,30	100,00
13	75,06	13,86	1,08	0,00	0,99	4,53	4,48	100,00



Таблица 7. Химический состав аморфной массы радужного обсидиана. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СПбГУ.

<b>Радужный обсидиан</b>						
Номера точек	Содержание, масс. %					
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	76,71	12,13	1,75	4,63	4,79	100,00
2	77,40	12,16	1,87	3,91	4,66	100,00
3	77,52	12,10	1,76	3,88	4,74	100,00
4	77,67	12,20	1,75	3,79	4,59	100,00
5	77,57	12,16	1,69	3,94	4,64	100,00
6	77,43	11,89	1,90	4,07	4,72	100,00

Таблица 8. Химический состав аморфной массы армянского обсидиана. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СПбГУ.

<b>Армянский обсидиан</b>									
Номера точек	Содержание, масс. %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	MnO	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	75,53	14,07	0,44	0,00	0,21	1,06	4,15	4,54	100,00
2	72,21	13,23	4,98	0,00	0,40	0,85	3,91	4,41	100,00
3	72,55	13,46	4,71	0,00	0,32	0,89	3,98	4,08	100,00
4	75,86	13,77	0,55	0,00	0,13	1,06	4,16	4,48	100,00
5	72,58	13,62	4,29	0,00	0,34	0,85	4,02	4,28	100,00
6	75,93	14,00	0,54	0,00	0,16	1,02	3,81	4,53	100,00
7	67,38	12,52	9,87	0,44	1,82	0,78	3,56	3,63	100,00
8	72,93	13,47	3,76	0,00	1,07	0,92	3,69	4,17	100,00
9	76,45	14,06	0,00	0,00	0,12	1,07	3,92	4,38	100,00
10	75,85	13,97	0,80	0,00	0,14	1,02	3,81	4,41	100,00
11	75,86	13,75	0,67	0,00	0,26	0,98	3,98	4,50	100,00
12	75,78	14,18	0,83	0,00	0,23	1,01	3,69	4,29	100,00
13	71,03	13,16	6,94	0,42	0,32	0,70	3,47	3,96	100,00
14	76,76	14,00	0,00	0,00	0,22	0,96	3,67	4,40	100,00

Таблица 9. Химический состав аморфной массы обсидиана «Слезы Апачи». Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНІ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СПбГУ.

<b>Обсидиан «Слезы Апачи»</b>							
Номера точек	Содержание, масс. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	78,19	12,58	0,64	0,47	3,26	4,85	100,00
2	78,00	12,65	0,54	0,00	3,80	5,02	100,00
3	78,16	12,46	0,65	0,42	3,47	4,84	100,00
4	78,30	12,45	0,00	0,61	3,57	5,08	100,00
5	78,18	12,60	0,60	0,45	3,37	4,80	100,00
6	75,65	14,88	0,87	0,00	3,29	5,31	100,00
7	78,13	12,66	0,59	0,47	3,35	4,80	100,00
8	78,10	12,72	0,62	0,44	3,43	4,70	100,00

Таблица 10. Химический состав аморфной массы снежного обсидиана. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНІ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СПбГУ.

<b>Снежный обсидиан</b>							
Номера точек	Содержание, масс. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	76,81	12,96	0,00	0,74	3,54	5,94	100,00
2	77,87	13,14	0,00	0,91	6,22	1,86	100,00
3	77,52	13,04	0,49	0,90	6,34	1,71	100,00
4	76,77	12,74	0,46	0,68	3,55	5,79	100,00
5	77,40	13,08	0,54	0,71	6,67	1,60	100,00
6	79,97	12,03	0,00	0,77	6,50	0,73	100,00
7	77,47	12,96	0,54	0,83	6,69	1,50	100,00
8	74,17	14,82	0,61	0,99	8,18	1,23	100,00
9	78,04	13,15	0,00	0,68	7,37	0,77	100,00
10	77,36	13,21	0,74	0,79	6,13	1,77	100,00
11	76,91	12,96	0,50	0,70	3,24	5,69	100,00
12	74,09	15,15	0,00	1,50	7,12	2,14	100,00
13	76,78	12,82	1,93	1,35	4,96	2,16	100,00
14	77,39	12,59	0,46	0,66	3,19	5,72	100,00
15	78,37	13,19	0,00	0,74	5,69	2,01	100,00

Таблица 11. Химический состав аморфной массы макузанита. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

<b>Макузанит</b>							
Номера точек	Содержание, масс. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	NaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма
1	74,56	16,59	0,00	5,42	3,43	0,00	100,00
2	73,73	16,78	0,00	5,48	3,25	0,75	100,00
3	74,43	16,29	0,63	3,82	4,10	0,72	100,00
4	75,33	16,39	0,64	3,65	3,99	0,00	100,00
5	75,33	16,36	0,60	3,76	3,94	0,00	100,00

Таблица 12. Химический состав аморфной массы ливийского стекла. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

<b>Ливийское стекло</b>					
Номера точек	Содержание, масс. %				
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	Сумма
1	100,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2	99,35	0,00	0,65	0,00	100,00
3	98,88	0,00	1,12	0,00	100,00
4	99,03	0,00	0,97	0,00	100,00
5	99,28	0,00	0,72	0,00	100,00
6	99,29	0,00	0,71	0,00	100,00
7	95,24	0,00	4,76	0,00	100,00
8	84,26	1,92	12,66	1,16	100,00
9	90,41	0,95	7,84	0,80	100,00

Таблица 13. Химический состав аморфной массы влтавита. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

<b>Влтавит</b>								
Номера точек	Содержание, масс. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	79,73	8,57	1,59	2,36	3,82	0,00	3,93	100,00
2	80,80	9,38	0,00	1,70	3,90	0,00	4,22	100,00
3	81,16	9,36	0,00	1,73	4,15	0,00	3,60	100,00
4	80,89	8,89	0,00	2,25	3,81	0,97	3,19	100,00
5	82,93	8,63	0,00	0,00	4,32	0,00	4,12	100,00
6	80,43	9,47	0,00	2,10	4,24	0,00	3,75	100,00

Таблица 14. Химический состав аморфной массы индошинита. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

<b>Индошинит</b>									
Номера точек	Содержание, масс. %								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	74,67	0,81	12,29	4,53	1,84	1,97	1,13	2,77	100,00
2	74,63	0,73	12,50	4,46	1,74	1,99	1,20	2,77	100,00
3	73,95	0,76	12,67	4,83	1,82	2,06	1,23	2,68	100,00
4	73,87	0,83	12,64	4,63	1,84	2,02	1,44	2,72	100,00
5	74,67	0,68	12,15	4,66	1,87	2,03	1,24	2,69	100,00
6	73,71	0,76	12,55	4,81	1,94	2,10	1,35	2,78	100,00

Таблица 15. Химический состав аморфной массы иргизита. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

<b>Иргизит</b>								
Номера точек	Содержание, масс. %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	77,93	9,02	6,04	3,54	1,85	0,00	1,62	100,00
2	76,86	9,55	5,66	3,41	2,18	0,82	1,52	100,00
3	76,54	9,35	5,82	3,57	1,99	0,96	1,77	100,00
4	78,57	9,53	4,82	3,22	2,00	0,00	1,86	100,00
5	78,88	9,49	4,18	2,71	1,85	1,09	1,80	100,00

Таблица 16. Химический состав аморфной массы тектитов (Россия). Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

<b>Тектиты (Россия)</b>									
Номера точек	Содержание, масс. %								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	74,31	0,80	12,68	4,60	1,98	2,12	1,19	2,33	100,00
2	71,49	0,73	12,32	4,48	1,91	2,09	2,70	4,27	100,00
3	74,60	0,67	12,76	4,54	1,86	2,16	1,10	2,32	100,00
4	73,85	0,86	12,92	4,69	2,02	2,18	1,22	2,27	100,00
5	74,35	0,78	13,02	4,52	1,98	2,16	0,97	2,23	100,00
6	74,04	0,78	13,08	4,55	2,11	2,13	1,09	2,22	100,00
7	74,70	0,74	12,81	4,38	1,89	2,01	1,10	2,37	100,00
8	73,91	0,77	12,80	4,54	1,97	2,12	1,33	2,57	100,00
9	78,27	0,52	10,93	3,58	1,68	1,56	1,37	2,09	100,00
10	75,71	0,78	12,11	4,38	1,76	1,71	1,31	2,24	100,00
11	74,80	0,74	12,73	4,46	1,76	1,71	1,20	2,59	100,00
12	75,08	0,77	12,27	4,48	1,85	1,84	1,25	2,47	100,00
13	69,69	0,78	11,42	4,18	1,62	1,80	2,25	8,26	100,00
14	75,05	0,70	12,62	4,60	1,82	1,75	1,18	2,29	100,00
15	75,09	0,80	12,21	4,46	1,84	1,96	1,21	2,43	100,00
16	75,13	0,74	12,58	4,45	1,77	1,75	1,22	2,35	100,00
17	75,42	0,73	12,39	4,18	1,81	1,73	1,36	2,37	100,00
18	75,95	0,55	12,24	4,22	1,81	1,59	1,40	2,24	100,00
19	75,08	0,71	12,15	4,30	1,77	1,74	1,37	2,88	100,00

Таблица 17. Химический состав аморфной массы «обсидиана». Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

<b>«Обсидиан»</b>							
Номера точек	Содержание, масс. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Сумма
1	74,14	2,13	3,02	8,00	11,55	1,16	100,00
2	73,41	2,10	3,15	7,62	12,60	1,12	100,00

Таблица 18. Химический состав аморфной массы тенгизита. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

<b>Тенгизит</b>								
Номера точек	Содержание, масс. %							
	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (общ.)</b>	<b>MnO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Сумма</b>
<b>1</b>	60,02	11,09	8,82	3,65	0,51	15,91	0,00	100,00
<b>2</b>	59,73	11,25	9,13	3,64	0,43	15,82	0,00	100,00
<b>3</b>	60,61	11,04	9,05	3,46	0,44	15,39	0,00	100,00
<b>4</b>	60,18	11,38	8,73	3,93	0,48	15,30	0,00	100,00
<b>5</b>	60,23	10,82	9,15	3,80	0,44	15,56	0,00	100,00
<b>6</b>	60,38	11,14	9,04	3,69	0,49	15,01	0,24	100,00

Таблица 19. Химический состав аморфной массы флюоресцентного «стекла». Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СПбГУ.

<b>Флюоресцентное «стекло»</b>							
Номера точек	Содержание, масс. %						Сумма
	SiO <sub>2</sub>	Cl	Ni	Zn	Cd	Dy	
1	62,38	0,00	0,00	0,00	37,62	0,00	100,00
2	48,84	0,00	0,00	0,00	51,16	0,00	100,00
3	24,38	0,00	0,00	0,00	74,06	1,56	100,00
4	49,28	0,00	0,00	0,00	50,72	0,00	100,00
5	61,21	0,00	0,00	0,00	38,56	0,23	100,00
6	62,49	0,00	0,00	0,00	37,51	0,00	100,00
7	24,09	0,00	0,00	0,00	73,92	1,99	100,00
8	48,97	0,00	0,00	0,00	51,03	0,00	100,00
9	49,12	0,00	0,00	0,00	50,70	0,18	100,00
10	48,95	0,00	0,00	0,00	51,05	0,00	100,00
11	14,90	17,43	0,00	0,00	66,79	0,88	100,00
12	24,06	0,00	0,00	0,00	74,01	1,92	100,00
13	60,82	0,00	0,00	0,00	38,89	0,29	100,00
14	62,46	0,00	0,00	0,00	37,26	0,28	100,00
15	49,26	0,00	0,00	0,00	50,74	0,00	100,00
16	49,38	0,00	0,00	0,00	50,62	0,00	100,00
17	58,69	0,00	0,00	0,00	40,84	0,47	100,00
18	17,00	23,49	0,00	0,00	58,53	0,97	100,00
19	24,48	0,00	0,00	0,00	73,52	2,00	100,00
20	27,37	0,00	0,00	0,00	70,62	2,01	100,00
21	49,19	0,00	0,00	0,00	50,81	0,00	100,00
22	62,75	0,00	0,00	0,00	37,25	0,00	100,00
23	23,66	0,00	0,00	0,00	74,41	1,93	100,00
24	49,11	0,00	0,00	0,00	50,89	0,00	100,00
25	58,63	0,00	0,00	0,00	41,37	0,00	100,00
26	18,59	15,12	0,00	0,00	63,67	2,61	100,00
27	63,12	0,00	0,00	0,00	36,88	0,00	100,00
28	49,34	0,00	0,00	0,00	50,66	0,00	100,00
29	23,91	0,00	0,00	0,00	73,98	2,11	100,00
30	21,77	6,01	6,76	0,74	62,89	1,82	100,00
31	23,87	0,00	0,00	0,00	73,84	2,28	100,00

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ В СТЕКЛАХ  
РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА

Таблица 20. Химический состав минеральных включений в исследуемых стеклах различного генезиса. Исследование проводилось на настольном растровом электронном микроскопе-микроанализаторе ТМ 3000 (НИТАСНИ, Япония), РЦ Микроскопии и микроанализа, СпбГУ.

Минерал	Содержание, масс. %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Сумма
<b>ОБСИДИАН "СЛЕЗЫ АПАЧИ"</b>									
<b>волластонит</b>	55,47	8,99	-	-	29,63	3,26	2,65	-	100
<b>ИНДОШИНИТ</b>									
<b>магнетит</b>	22,58	4,24	73,19	-	-	-	-	-	100,01
<b>хромит (Mg)</b>	23,27	13,57	18,23	11,36	-	-	-	33,58	100,01

В химическом составе каждого минерала присутствуют компоненты стекла-«хозяина».

Таблица 21. Химический состав минеральных включений в исследуемых стеклах различного генезиса. Исследование проводилось на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N, РЦ «Геомодель», СпбГУ.

В химическом составе каждого минерала присутствуют компоненты стекла-«хозяина».



Минерал	Содержание, масс. %																				
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	MnO	MgO	CaO	NaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CuO	Zr	Y	La	Ce	Nd	Hf	Th	U	Сумма	
<b>ЧЕРНЫЙ ОБСИДИАН</b>																					
авгит	45,84	-	6,28	24,94	1,37	1,43	19,24	0,68	0,32	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,1
магнетит	11,86	0,49	2,15	83,57	-	-	0,35	-	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98,75
оливин	37,06	-	3,34	53,76	2,12	0,94	4,58	1,17	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	103,59
<b>ИРИЗИРУЮЩИЙ ОБСИДИАН</b>																					
апатит	45,47	-	0,79	-	-	-	-	-	55,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	101,51
авгит	43,06	2,75	13,58	12,06	-	15,42	-	1,14	8,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96,62
андезин/лабрадор	62,7	-	23,6	-	-	-	5,85	8,08	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,93
магнетит	2,76	2,8	1,91	82,06	1,5	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	92,18
оливин	41,37	-	7,95	52,69	0,46	0,93	0,58	3,69	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	109,68
<b>РАДУЖНЫЙ ОБСИДИАН</b>																					
авгит	68,77	-	10,48	13,27	0,59	0,58	6,56	3,88	2,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	107,1
альбит	70,49	-	18,73	0,62	-	-	0,36	10,28	2,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	102,52
магнетит	19,83	0,74	3,38	73,39	0,74	0,61	1,66	2,3	0,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	103,39
<b>АРМЯНСКИЙ ОБСИДИАН</b>																					
апатит	0,63	-	-	-	-	0,17	54,88	0,25	0,08	44,52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100,53
авгит	61,11	-	11,34	13,13	1,81	13,75	2,65	1,87	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	107,25
магнетит	15,95	-	3,83	78,31	1,78	0,28	-	1,83	0,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	102,55
оливин	24,97	-	4,86	56,96	1,3	0,13	0,45	1,02	1,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	91,31
<b>ОБСИДИАН "СЛЕЗЫ АПАЧИ"</b>																					
авгит	66,02	-	10,77	10,13	2,69	6,52	9,34	3	2,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	110,7
циркон	32,57	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	63,83	-	-	-	-	1,42	-	-	-	97,83
<b>СНЕЖНЫЙ ОБСИДИАН</b>																					
магнетит	11,34	0,87	2,02	80,72	0,87	0,68	0,71	-	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97,8
оливин	46,09	2,51	13,44	29,39	0,9	4,04	-	2,1	7,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	106,38
<b>МАКУЗАНИТ</b>																					
монацит	0,71	-	-	-	-	-	2,21	-	-	30,68	-	-	2,62	12,03	23,66	9,18	-	9,13	3,12	-	93,34
силлиманит/андалузит	49,41	-	46	0,39	-	-	-	1,41	1,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98,63
циркон	32,21	-	1,31	-	-	-	-	0,56	0,38	-	-	53,64	-	-	-	-	0,9	-	1,76	-	90,77
<b>ЛИВИЙСКОЕ СТЕКЛО</b>																					
циркон	32,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	66,6	-	-	-	-	1,6	-	-	-	100,25
<b>ВЛАВИТ</b>																					
альбит	65,29	-	7,84	1,21	-	1,64	3,42	22,79	3,39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	105,57
<b>ТЕНГИЗИТ</b>																					
железо	0,51	-	-	132,33	-	-	0,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	133,51
железо+медь	32,42	-	7,09	86,87	1,39	0,38	6,1	-	-	-	2,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	137,07

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. СПЕКТРЫ МИНЕРАЛЬНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В  
ИССЛЕДУЕМЫХ ПРИРОДНЫХ СТЕКЛАХ

*Черный обсидиан:*

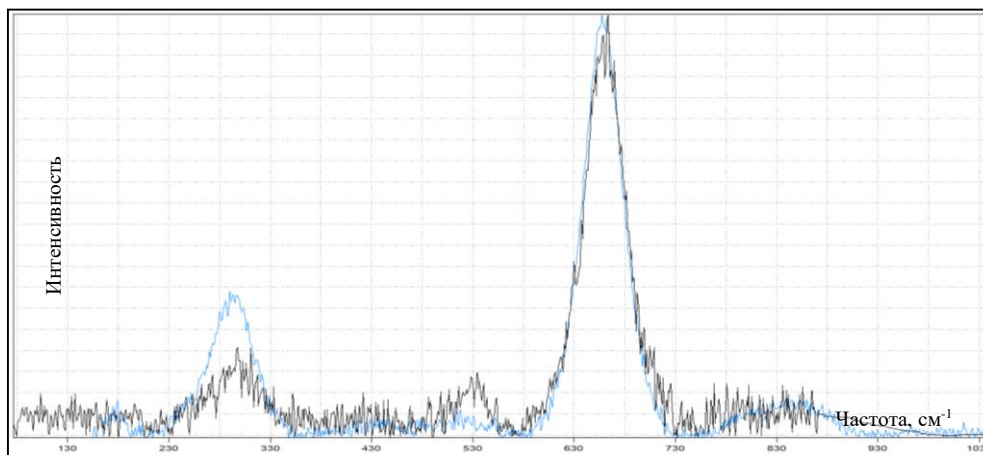


Рис. 66. Спектр включения в черном обсидиане. Синий спектр – спектр магнетита (RRUFF).

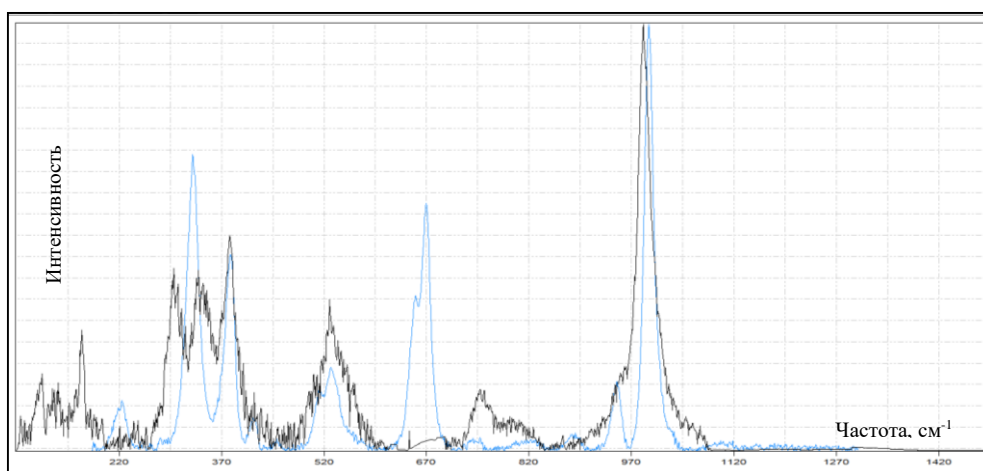


Рис. 67. Спектр включения в черном обсидиане. Синий спектр – спектр ферросилита (RRUFF).

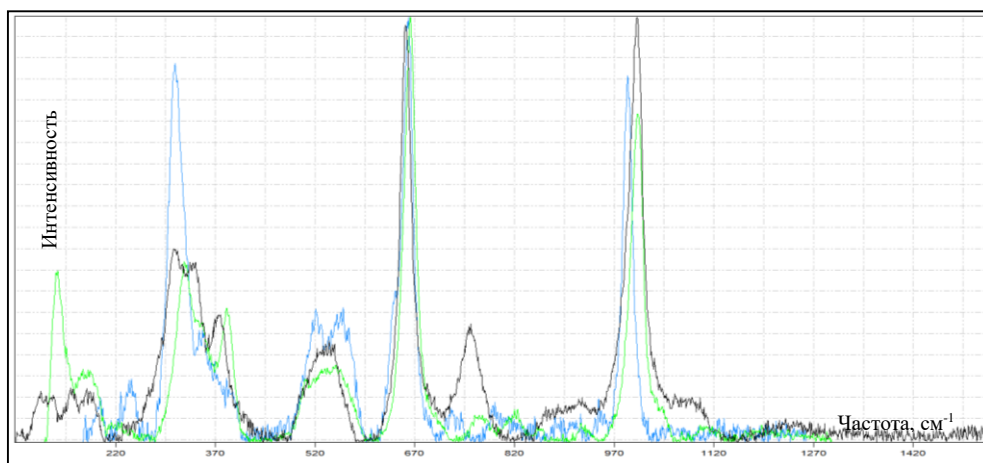


Рис. 68. Спектр включения в черном обсидиане. Синий спектр – спектр ферросилита.  
Зеленый спектр – спектр авгита (RRUFF).

***Иризирующий обсидиан:***

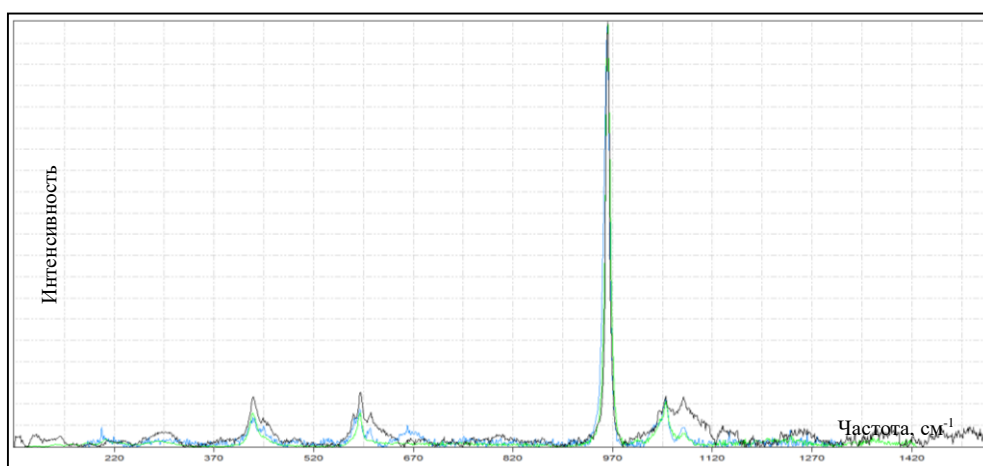


Рис. 69. Спектр включения в иризирующем обсидиане. Синий спектр – спектр циркона.  
Зеленый спектр – спектр монацита (RRUFF).

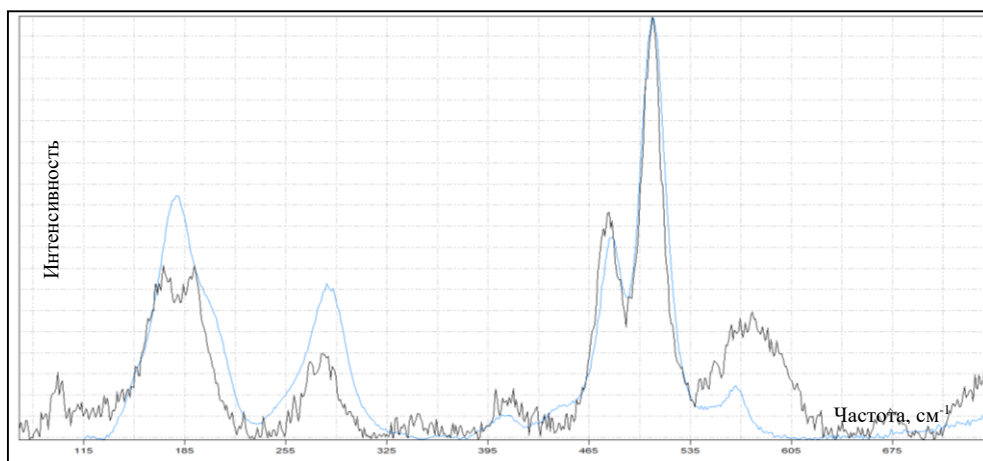


Рис. 70. Спектр включения в иризирующем обсидиане. Синий спектр – спектр лабрадорита (RRUFF).

*Радужный обсидиан:*

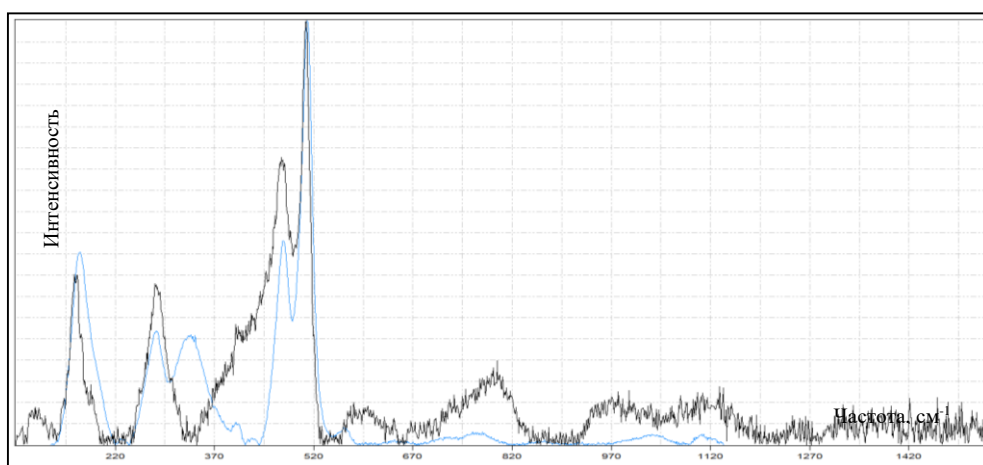


Рис. 71. Спектр включения в радужном обсидиане. Синий спектр – спектр анортоклаза (RRUFF).

**Обсидиан «Слезы Апачи»:**

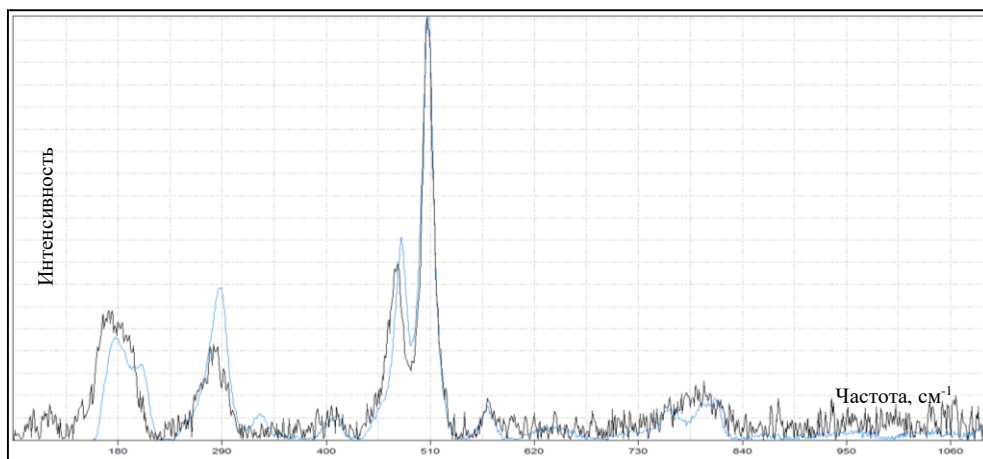


Рис. 72. Спектр включения в обсидиане «Слезы Апачи». Синий спектр – спектр олигоклаза (RRUFF).

**Макузанит:**

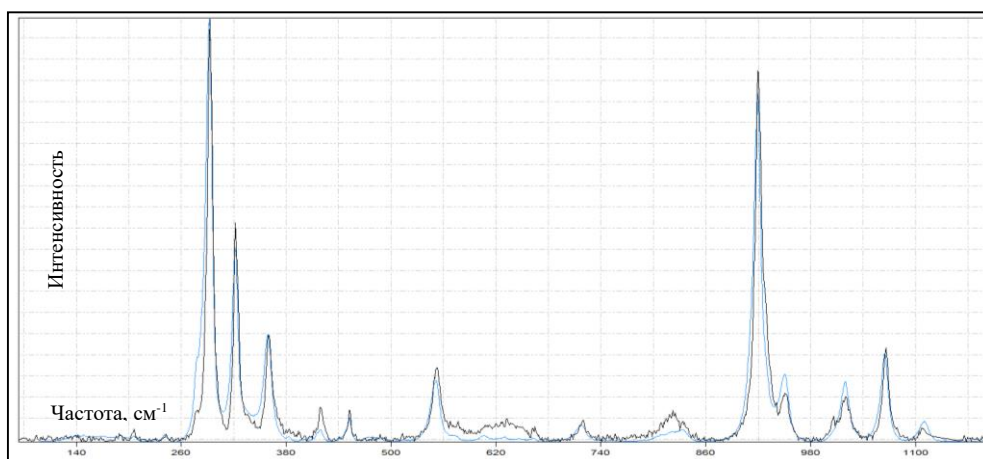


Рис. 73. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр андалузита (RRUFF).

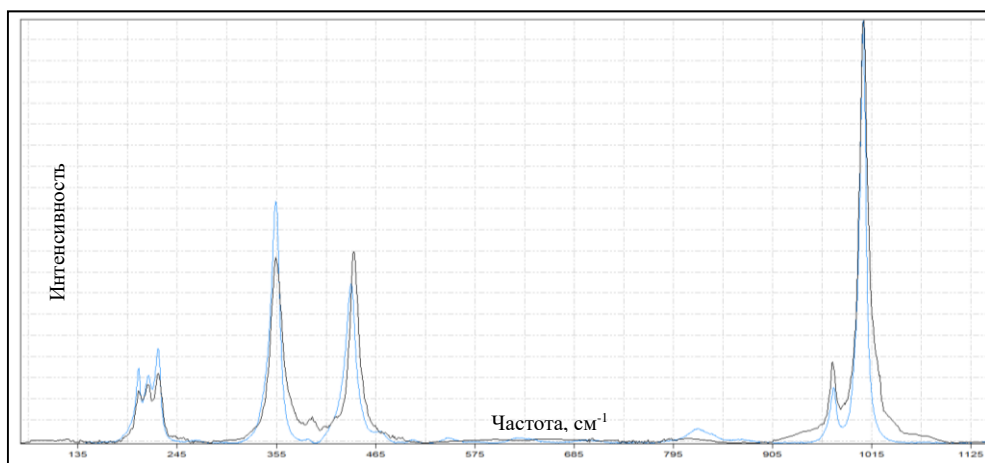


Рис. 74. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр циркона (RRUFF).

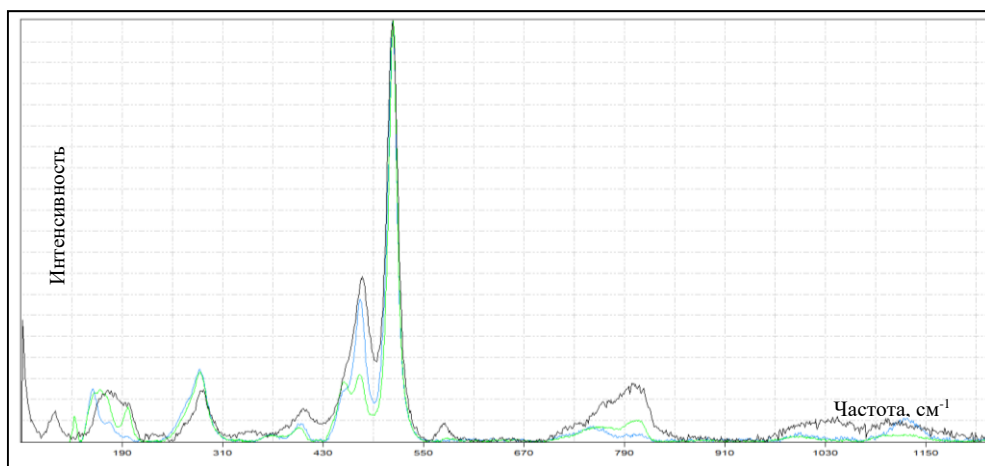


Рис. 75. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр санидина (RRUFF).

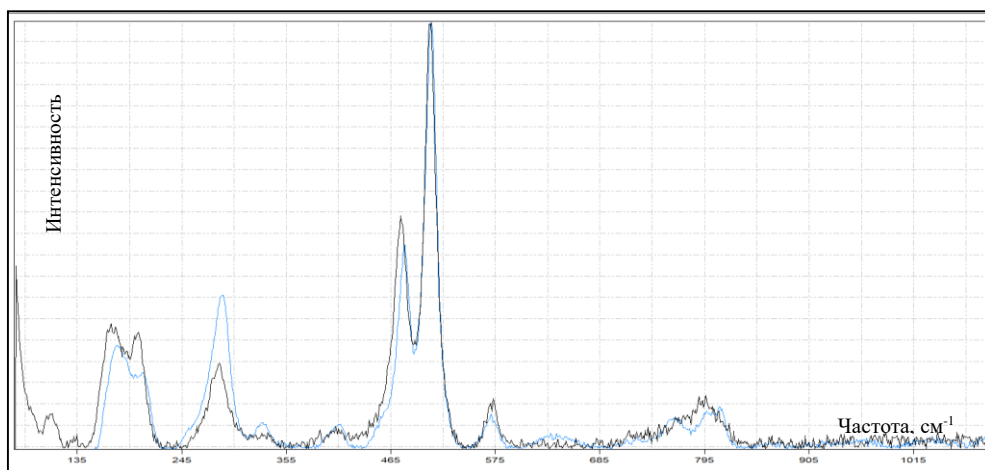


Рис. 76. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр олигоклаза (RRUFF).

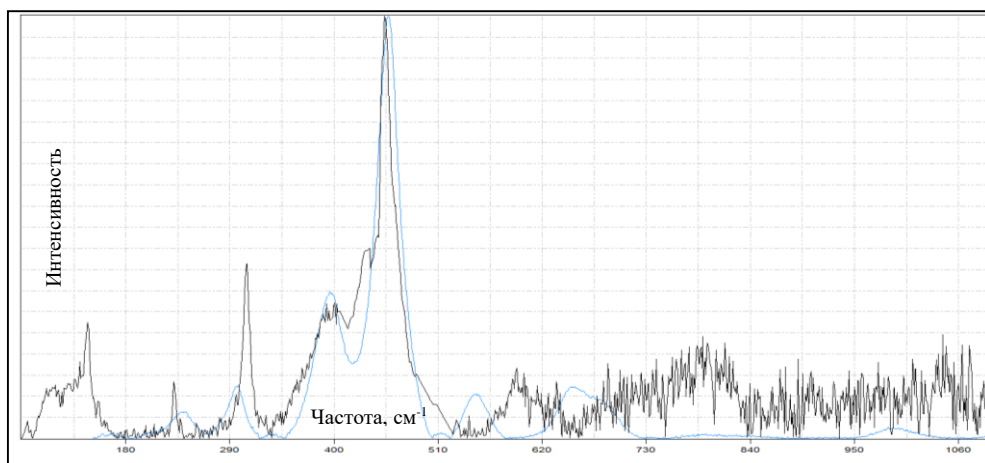


Рис. 77. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр церианита (RRUFF).

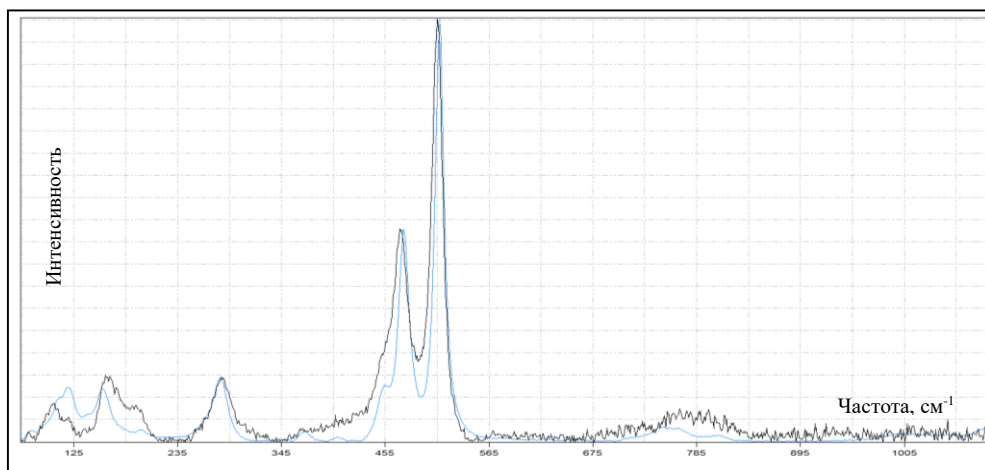


Рис. 78. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр ортоклаза (RRUFF).

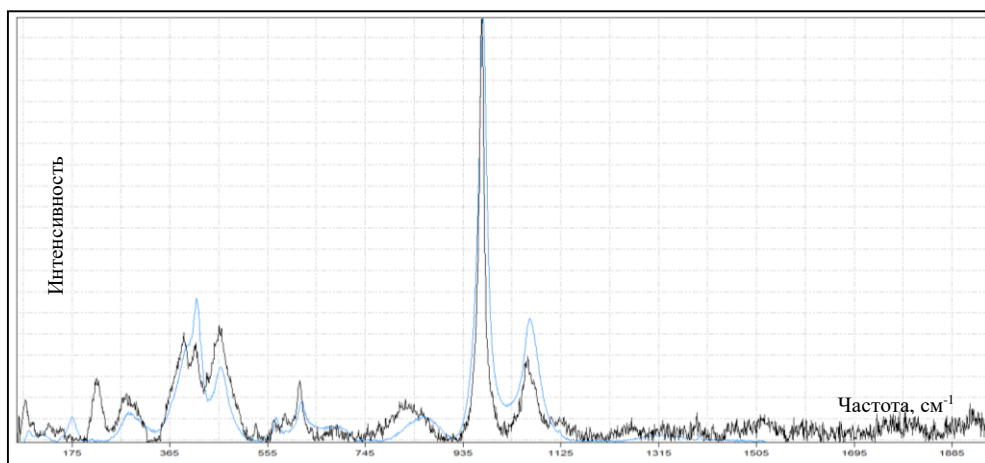


Рис. 79. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр монацита (RRUFF).

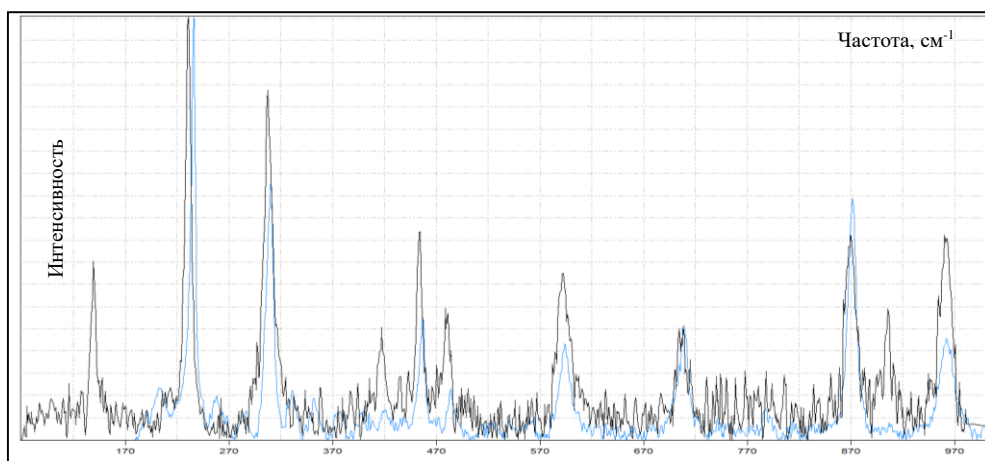


Рис. 80. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр силлиманита (RRUFF).

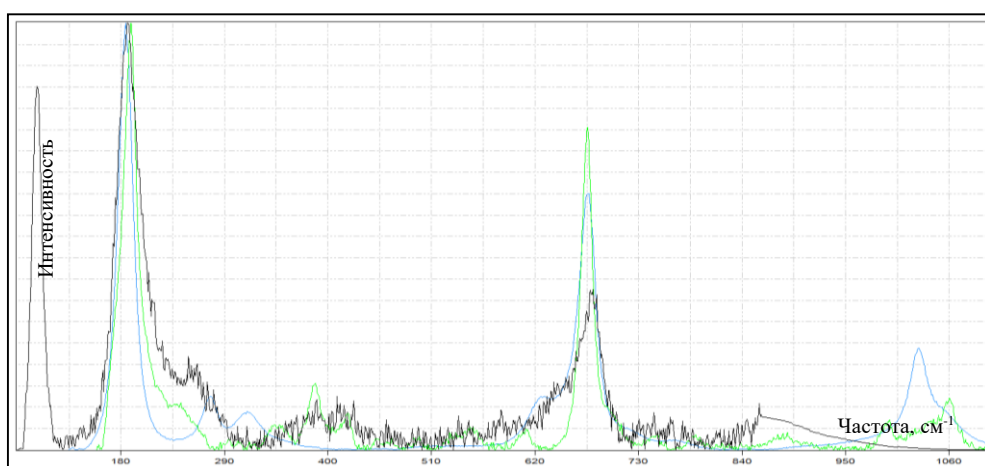


Рис. 81. Спектр включения в макузаните. Зеленый спектр – спектр феррохолмквистит (RRUFF).



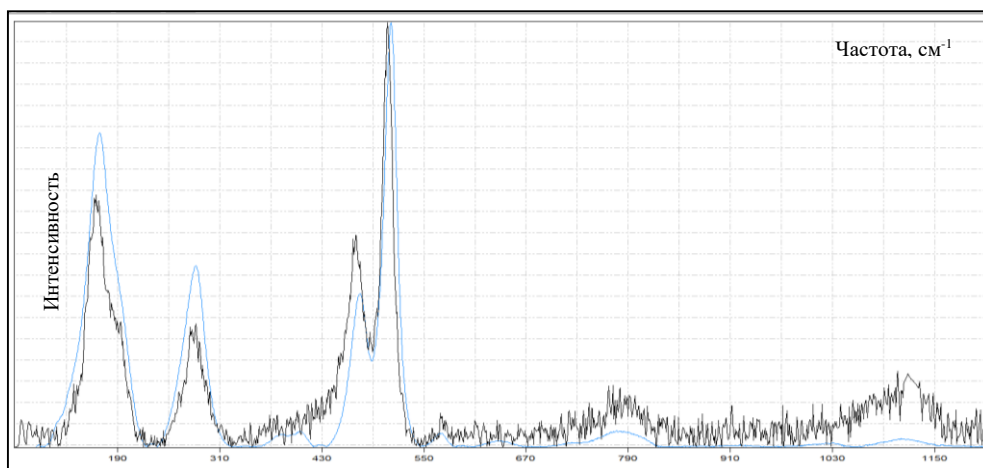


Рис. 82. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр анортоклаза (RRUFF).

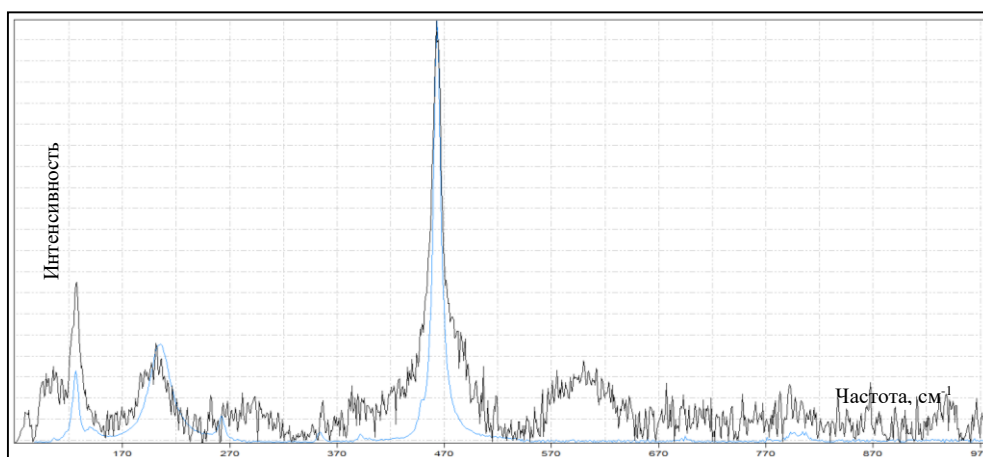


Рис. 83. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр кварца (RRUFF).

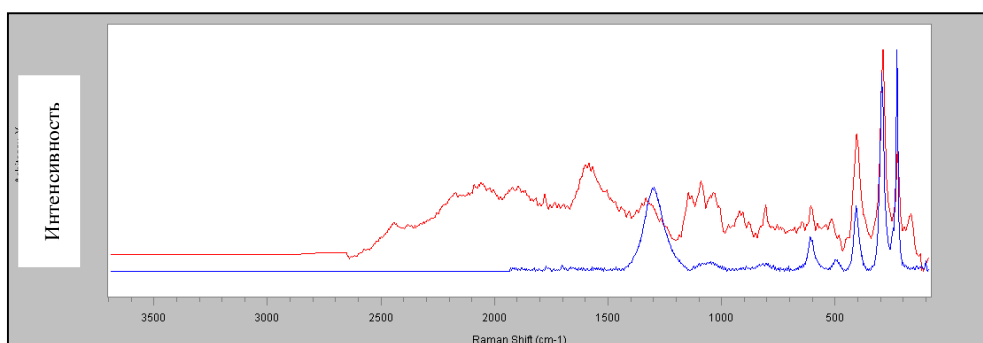


Рис. 84. Спектр включения в макузаните. Синий спектр – спектр гематита (RRUFF).

**Влтавит:**

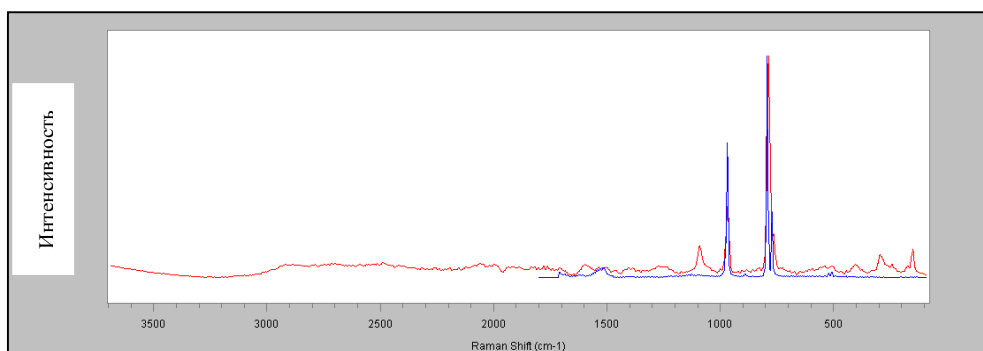


Рис. 85. Спектр включения во влтавите. Синий спектр – спектр муассанита (RRUFF).

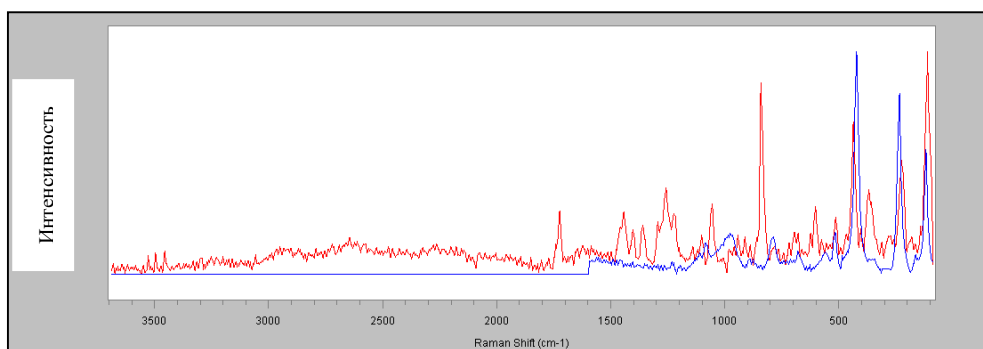


Рис. 86. Спектр включения во влтавите. Синий спектр – спектр кристобалита (RRUFF).

**Ливийское стекло:**

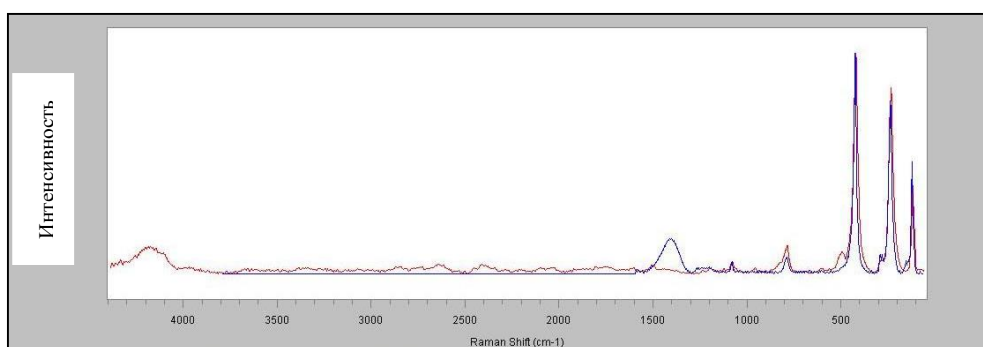


Рис. 87. Спектр включения в ливийском стекле. Синий спектр – спектр кристобалита (RRUFF).

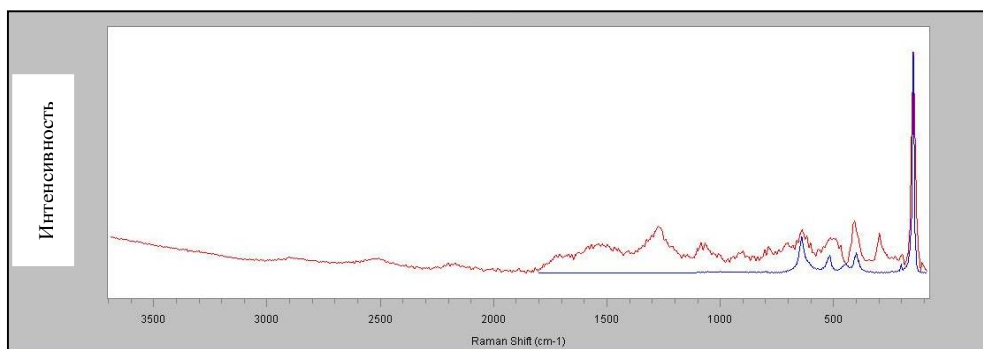


Рис. 88. Спектр включения в ливийском стекле. Синий спектр – спектр оксида титана (RRUFF).

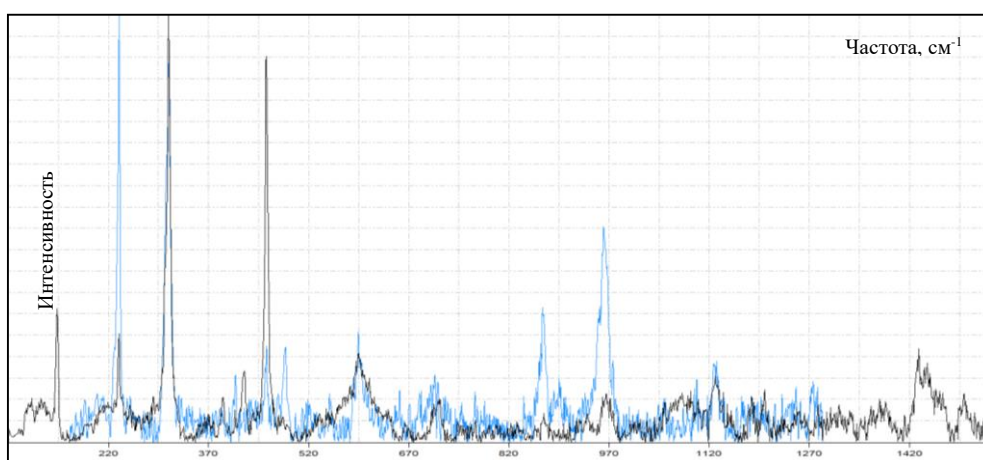


Рис. 89. Спектр включения в ливийском стекле. Синий спектр – спектр силлиманита (RRUFF).

**Иргизит:**

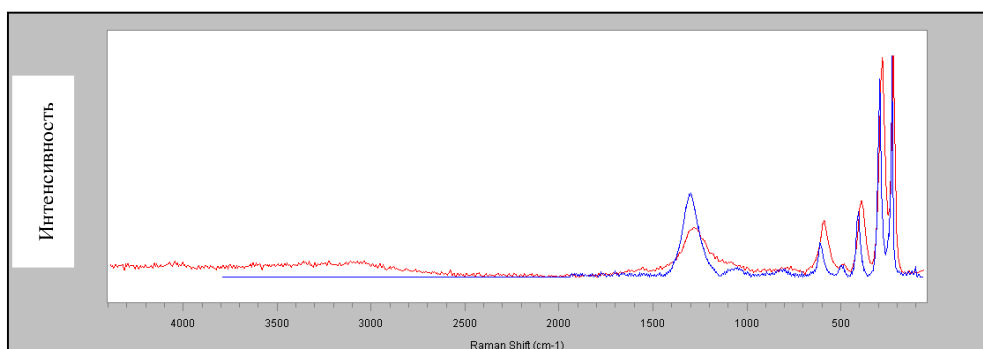


Рис. 89. Спектр включения в иргизите. Синий спектр – спектр гематита (RRUFF).